《实验流体力学》指定参考书

流体力学实验指导书

天津大学流体力学实验室

二零一二年四月

实验须知

进行一个流体力学实验，必须经过实验预习、实验操作、实验总结等几个主要环节。

一、实验前的准备

（1）在实验课开始之前，应分好实验小组。

（2）每次实验课前，要求学生阅读实验指导书，明确本次实验的目的、实验原理、实验步骤以及注意事项；复习教材中有关内容，搞清楚实验原理和有关理论知识；对某些实验，还应该进行必要的设计、计算，同时回答书中提出的思考题。

二、实验操作

（1）实验课开始应认真听取指导教师对实验的介绍。

（2）分组后先检查仪器设备是否齐全和是否完好，如发现问题应及时报告指导教师。

（3）实验过程中，必须爱护仪器设备，遵守操作规程，严禁乱动、乱拆。如有损坏丢失，必须立即报告指导教师，由实验室酌情处理。因违反规章制度、不遵守操作规程而造成仪器损坏者，需按规定进行赔偿。

（4）实验室内严禁吸烟、吐痰、吃东西和乱扔纸屑。除实验必须的讲义、记录纸及文具以外，个人的书包及衣物等一概不要放在实验台上。实验室不得大声喧哗，注意保持肃静。

（5）实验做完后，需先经指导教师审查数据并签字，然后在将仪器设备按原样整理完毕，搞好实验室卫生，经教师允许后方可离去。

三、实验总结

学生必须在实验的基础上，对实验现象及数据进行整理计算和总结分析，然后认真写好实验报告。编写报告的过程是一个从感性认识到理论认识的提高过程，也是一个加深理解和巩固理论知识的过程。因此必须重视并写好实验总结报告，在规定的时间内交给教师批阅。

目录

实验 1 毕托管的标定

一. 实验原理

在理想不可压流体的定常无旋流动中，毕托管测速的理论公式为：

$$P_0 - P = \frac{\rho U^2}{2}$$

此式表明：知道了流场中的总压（P_0）和静压（P），其压差即为动压；由动压，可计算出流体速度。

$$U = \sqrt{\frac{2(P_0 - P)}{\rho}}$$

毕托管的头部通常为半球形或半椭球形，管径应选 $d \le 0.035D$（D 为被测流体管道的内径，总压孔开在头部的顶端），孔径为 0.3d。静压孔开在距顶端（3～5）d 处，距支柄（8～10）d 的地方，一般为 8 个均匀分布的 $\Phi 0.1d$ 小孔（NPL 为 7 孔）。总压与静压分别由两个细管引出，再用胶皮管连接到微压计上，即可测出动压，从而可计算出流速。（如图 1 所示）

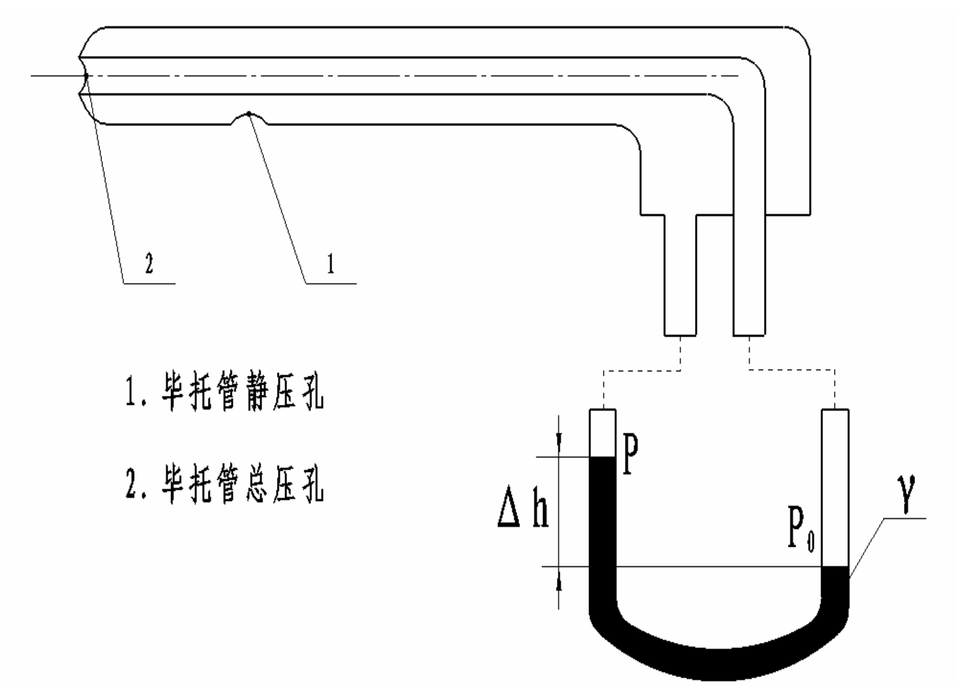


图 1 毕托管测速原理图

若要测量流场中某一点的速度，需将毕托管的顶端置于该点，并使总压孔正对来流方向，通过微压计就能得到该点的动压。在来流是空气的情况下，有 $\frac{\rho U^2}{2} = P_0 - P = \gamma h$，（$\rho$ 是

空气的密度，γ是微压计中工作液体的重度，h是微压计的读数）。但是由于粘性及毕托管加工等原因，$P_0 - P = \frac{\rho U^2}{2}$不是正好满足的，需要进行修正。根据1973年英国标准BS-1042：Part2A1973的定义：

$$P_0 - P = \frac{1}{2} C \rho U^2$$

C－毕托管系数。所谓毕托管标定，就是要把C的数值通过实验确定下来。

标定毕托管一般是在风洞中进行的，要求：（1）风洞实验段气流均匀，湍流度小于0.3％；（2）毕托管的堵塞面积小于实验段截面积的1/200；（3）毕托管插入深度h>2nd(n=8,d为毕托管直径)；（4）安装偏斜角小于2º；（5）以d为特征长度的雷诺数必须大于250；（6）最大风速不能超过$\frac{2000\mu}{\rho d_S}$（μ是空气动力粘度，d_S为静压孔直径）。这几点如能得到满足，C 就决定于毕托管的结构，此时$C = C_0$称为毕托管的基本系数。流体力学实验室从英国进口了一支经过标定的NPL毕托管，C=0.998。

毕托管进行标定时，将待标定的毕托管　与NPL标准管安装在风洞实验段的适当位置上（总的原则是让两支管处于同一均匀气流区）因为是均匀流，则有

$$\frac{C_{标准}}{2} \rho U^2 = \Delta P_{标准} = h_{标准} \gamma$$

$$\frac{C_{待标}}{2} \rho U^2 = \Delta P_{待标} = h_{待标} \gamma$$

上面两式中，ρ、U、γ均是同一的。两式相除，得

$$\frac{C_{待标}}{C_{标准}} = \frac{h_{待标}}{h_{标准}}$$

则

$$C_{待标} = C_{标准} \frac{h_{待标}}{h_{标准}}$$

$$\because \quad C_{标准} = 0.998$$

$$\therefore \quad C_{待标} = 0.998 \frac{h_{待标}}{h_{标准}}$$

上式是毕托管标定的基本公式。通常是在10个不同风速下测量其$C_{待标}$取其平均值；也可以用10种不同风速下的$h_{待标}$和$h_{标准}$按最小二乘法求其基本系数。

二、 实验仪器和设备

1. 低速回流风洞。
2. NPL 标准毕托管，待标定毕托管。
3. 钟罩式精密微压计。

三、 实验目的和要求

要求用所给实验仪器和设备，设计一套标定毕托管的实验装置和实验方案，画出实验装置图并连接实验装置。通过本实验，达到以下目的：

1. 了解毕托管测速原理及标定方法。
2. 学会求出毕托管基本系数的方法。

四、 实验装置图

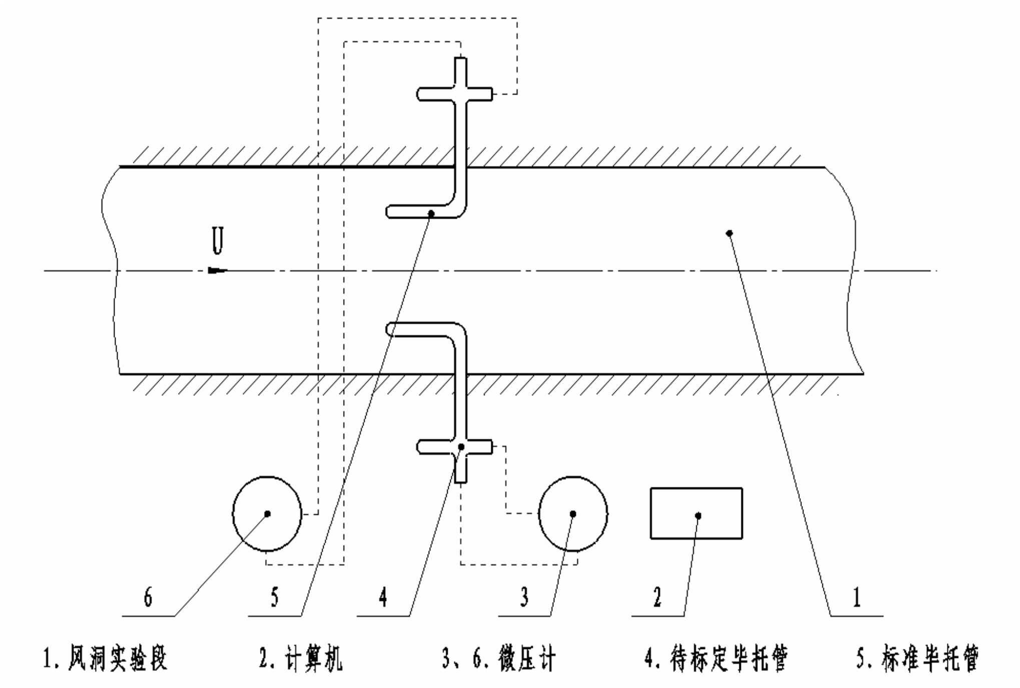


图 2 毕托管标定实验装置图

五、 问题讨论与思考

1. 毕托管测速的基本原理是什么？
2. 实验前应做好哪些准备工作？
3. 影响毕托管系数的因素有哪些？
4. 讨论产生实验误差的主要原因。
5. 如何提高用毕托管测速的精度？

实验 2 低速风洞调速

一、实验原理

天津大学流体力学实验室低速风洞为闭口回流式风洞，是天津大学力学系应用力学教研室的老师们于上世纪六十年代初在张国藩校长的带领下克服重重困难，自行设计建造的，风洞于 1964 年建成并投入使用。十年浩劫中，风洞历经劫难，险些被毁。改革开放以后，风洞在流体力学教学和科研中发挥重要作用，为流体力学学科的发展和建设立下汗马功劳。该风洞主要由实验段、收缩段、扩散段、稳定段、风扇整流系统、驱动电机和控制系统等部分组成。常用风速是（2～40）米/秒，由 22 千瓦的三相异步电机驱动风扇产生。实验段截面为切角的矩形（形似八角形），宽 0.8 米，高 0.6 米，其长度为 1.5 米。整座风洞占地面积约为 11×4.7 米 ^{2}。



图 2-5-1 天津大学流体力学实验室低速回流式风洞

电机的转数是通过 SVF－303 变频器来控制的，从而实现风洞实验段气流速度的改变。电机转数通过数字式转速表测量，实验段风速则用毕托管测定。实验结果表明：风速与单位时间内电机转数之间为线性关系，即电机转数的高低，反映实验段气流速度的高低，并且一一对应。

根据英国标准 BS－1042 : part 2A1973 的定义，流速

$$U = \sqrt{\frac{2\Delta P}{C\rho}} \tag{1}$$

式中　U—流速，m/s

ΔP—毕托管测出的差压，N/m^2

ρ—气流密度，kg/m^3

C—毕托管系数，现用 NPL 标准毕托管，C＝0.998。

因为是精确测量，要考虑空气密度的变化。由完全气体的状态方程

$$P = \rho RT \tag{2}$$

当空气从某一状态 P_0、ρ_0、T_0 变化到另一状态 P、ρ、T，则由 $P_0＝R\rho_0T_0$ 和

P＝RρT 可得

$$\rho = \rho_0 \frac{P}{P_0}\frac{T_0}{T} \tag{3}$$

选取标准大气为已知状态，即取 $P_0 = 760mmHg, T_0 = 273°K$

设测压计工作液体是水，则

$$\begin{cases} \Delta P = \gamma_{水} \Delta h \\ \gamma_{水} = 9810\ N/m^3 \end{cases} \tag{4}$$

将(b)、(c)、(d)代入(a)，经整理得到

$$U = 4.04\sqrt{\frac{760}{B}\frac{273+t}{293}\Delta h} \tag{5}$$

即为风洞实验段气流速度计算的实用公式。

式中　B—当时当地大气压，mmHg

t—气流的温度，℃

Δh—测压计读出的差压，mmH_2O

近似估计时，可用

$$U = 4.04\sqrt{\Delta h} \tag{6}$$

在导出上述公式时，是用环境压力（大气压）代替实验段静压进行计算的。对于我们的风洞，两者差别不到 $10mmH_2O$，对速度的影响小于万分之四，因此对于一般性试验，作这样的处理是完全允许的。

二、实验目的和要求

1、掌握低速回流式风洞基本构造和主要部件的功能；
2、理解风洞变频调速原理，学会开风洞；
3、学会用热线风速仪和 TSI-1210-T1.5 单丝热线探针测量风洞试验段气流的平均速度；
4、学会用毕托管测量风洞试验段气流平均流速；
5、了解毕托管测速和热线测速之间的差异及其产生的原因；
6、学会用转速表测量电机转速；
7、了解天津大学流体力学实验室低速回流式风洞的建造历史。

三、实验仪器和设备

1、低速回流风洞；2、IFA300 恒温热线风速仪；3、TSI1210-T1.5 单丝热线探针；4、三维步进电机控制坐标架；5、计算机及实验数据分析软件；6、毕托管；7、补偿式微压计；8、气压计；9、温度计；10、数字式转速表。

四、实验装置

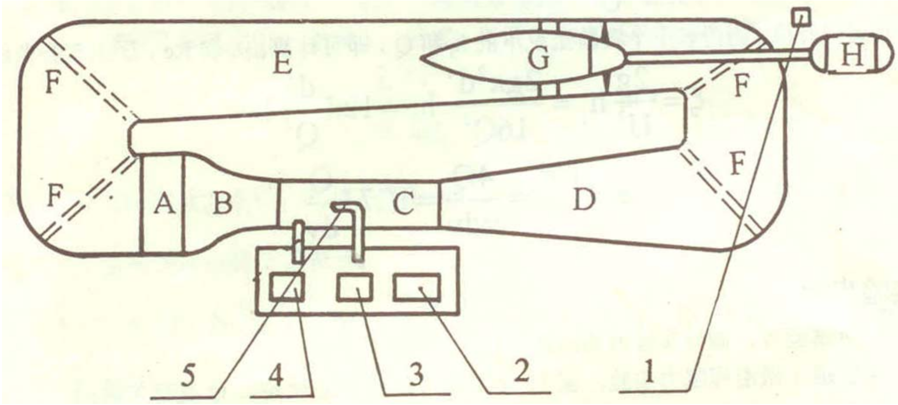


图 2-5-2

1. 转速表　2. 计算器　3. 微压计　4. 气压表　5. 毕托管

A. 稳定段　B. 收缩段　C. 实验段　D. 扩散段

E. 回流段　F. 拐角导流片　G. 风扇整流系统　H.电机

五、实验操作步骤

1、做好准备工作。如打开仪器电源开关、预热、微压计调零、检查风洞和电机以确保安全，参加实验人员分工等。

2、开启风洞，将电机转数调到能维持正常运转的最小转数，作为实验的起始状态，待稳定后，记下此时的转数、微压计读数及风洞实验段的气流温度。

3、按需要增大电机转数，待稳定后记录上述三项数据，如此直到允许的最大转数为止。

4、根据实验情况决定是否需要重复试验。

5、停止风洞运转，整理有关仪器。

6、将大气压强、气流温度、微压计读数代入流速计算公式计算，这一工作可事先编好程序，用计算器（或计算机）来完成。

7、编写实验报告。

六、问题讨论与思考

1、风洞实验段气流速度与电机转数之间存在什么关系？为什么？

2、实验段气流温度变化怎样？原因是什么？如何减缓实验段气流温升？

3、实验段气流温度变化对毕托管测速和热线测速影响如何？

4、试分析毕托管测速和热线测速结果有何差异？原因是什么？

实验 3 用毕托管测量自由射流平均速度剖面

一、实验原理

射流（如图 1 所示）是工程中广泛存在的流体流动形式，有重要的工程应用背景，工程技术中的大量问题与射流密切相关。射流中复杂的流动结构来源于射流边界与周围环境的强剪切作用。例如，内燃机中雾化燃料和空气的混合物从喷嘴射入燃烧室并点火燃烧就是射流，随着人们环保意识的日益提高，如何提高雾化燃料和空气的混合燃烧效率，降低尾气排放，以节约能源、保护环境；在化工领域，很多化学反应都是在射流过程中完成的，控制射流边界，增强卷吸混合效果可以加快化学反应速度，提高物料混合和传热、传质效率；在航空航天领域，射流的智能控制可以有效地提高推力矢量的精度，提高飞行器的机动性能。非圆型出口射流控制是进行射流被动控制的有效技术，以不用花太大的代价，仅靠改变射流出口的几何形状就可以显著改善以射流及其瞬态流动结构的发展演化过程，增强射流与环境流体的混合。在钻井过程中，在钻头上合理配置多个非对称加齿出口的高压泥浆射流，利用产生的非对称压力和剪切力可以有效提高钻井的速度和效率。

通常可认为射流在喷口处平均速度是均匀分布，流体从喷管中喷出后，不仅沿喷管轴线方向运动，还会发生剧烈的横向运动使得射流与原来静止的流体不断掺混，进行质量与动量交换，从而带动周围的静止流体一起运动。离喷口越远，被带动的质量越多，随着离喷口的距离增大，各截面上的速度分布逐渐改变，故射流呈扩散状。



图 1、圆出口自由淹没射流照片

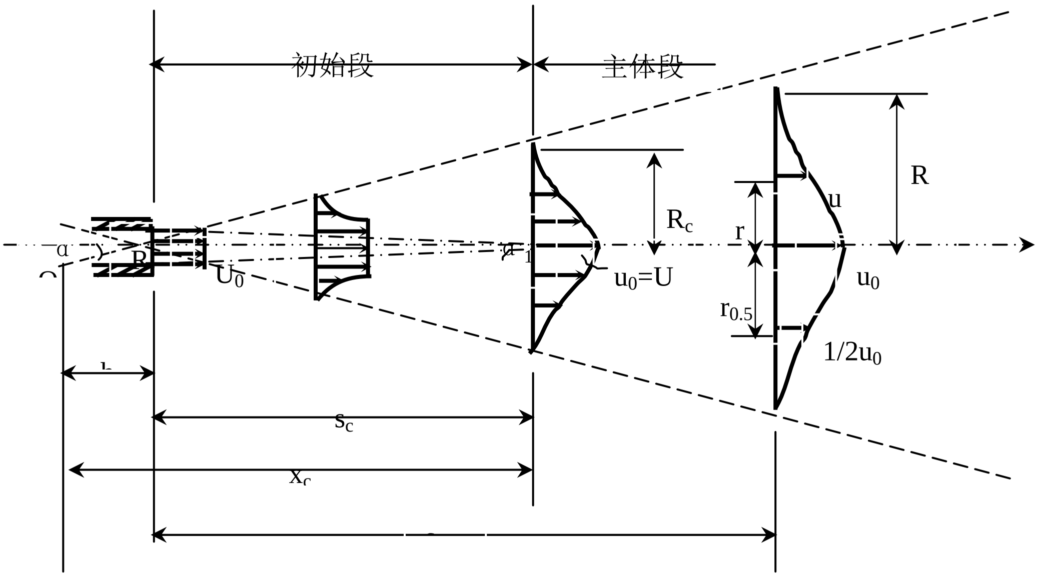


图 2 圆出口自由淹没射流平均流场示意图

二、实验仪器和设备

1、空气动力学多功能实验装置（或低速射流风洞）

在本实验中采用 VEB 型小型吹入式直流射流风洞作为湍射流的发生装置，如图 2 所示。该射流风洞由轴流风扇动力系统、前直管段、两级收缩段以及直管喷口等几部分组成。其喷口直径 D 为 80mm，出口流速在 0～30m/s 之间连续可调。

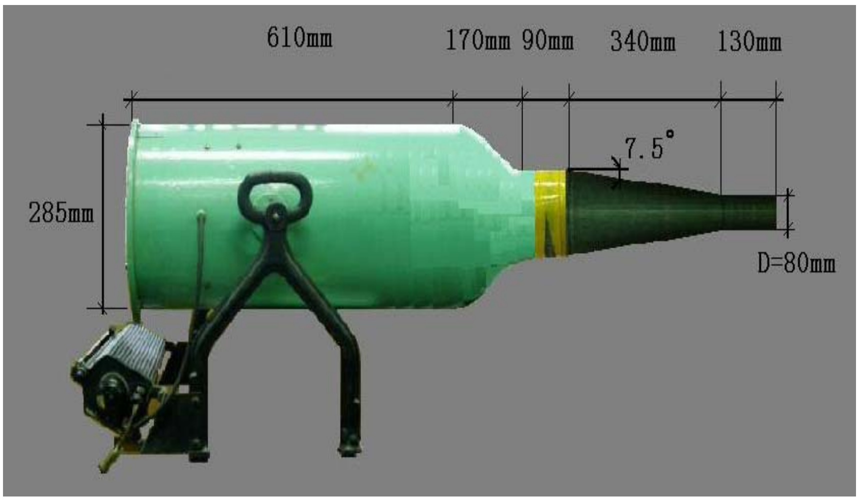


图 3. VEB 型小型吹入式直流射流风洞

2、毕托管

3、微压差计

4、小型坐标架

三、实验目的和要求

要求用所给实验仪器和设备，设计测量圆出口自由淹没射流各横截面上平均流速空间分布的实验装置和实验方案，画出实验装置图并连接实验装置。要求通过本实验，测出 x＝2d，

4d，6d 各截面上的速度分布曲线；确定射流核心区，射流极点、射流扩散角及初始段长度等。绘出各横截面上平均速度分布曲线（如图 4 所示）。通过实验达到以下目的：

1、学会用毕托管测量气流的平均速度；

2、了解轴对称或矩形自由射流平均流速空间分布规律；

3、通过各射流截面流速分布测量确定射流核心区。

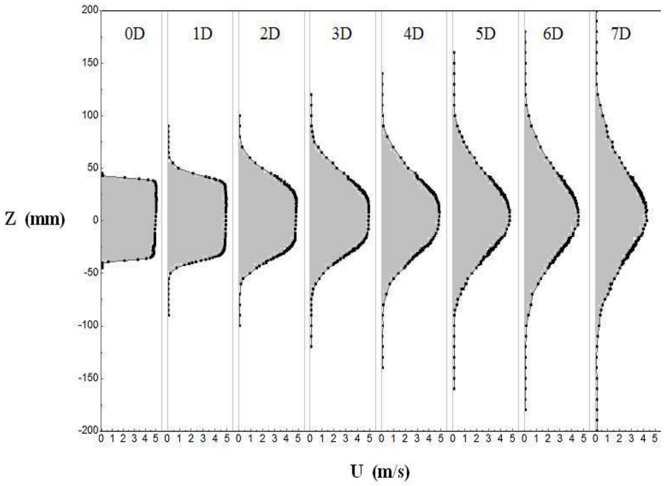


图 4　圆射流 0—7D 各截面的流向速度剖面分布

四、实验条件参数及公式

空气温度 t＝　　　　　　℃；大气压强 Pa＝　　　　　　mmHg；

喷口直径(宽度 b)d＝　　　　　mm；

流速计算公式

$$u = 4.04\sqrt{\frac{760}{Pa}\frac{273+t}{293}\Delta h}\quad \text{(m/s)}$$

射流扩散角　$tg\frac{\theta}{2} = \frac{R}{x}$　　$R_0 = \frac{d}{2}$ 喷口半径

x_T—转折截面至射流极点距离

五、问题讨论与思考

1、轴对称射流为什么呈喇叭形？

2、射流各截面的流量是否相等？

3、射流边界上流体速度是否为零？

实验 4　圆出口自由射流的流动显示

一、实验原理

流体从喷管中喷出后，不仅沿喷管轴线方向运动，还会发生剧烈的横向运动使得射流与原来静止的流体不断掺混，进行质量与动量交换，从而带动周围的静止流体一起运动。观察自由射流的瞬时流动，可以看到瞬态流动结构是极不规则的（如图 1 所示）。

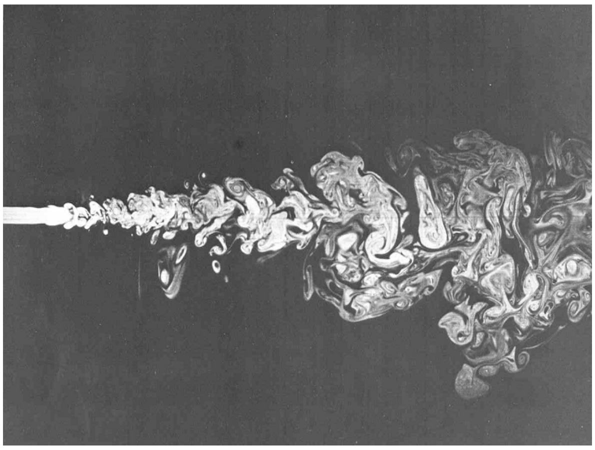


图 1 圆出口自由射流瞬态不规则流动结构

由于激光的亮度高，方向性好，所以可以用作流动显示的光源，得到的流动图像清晰度高。而流场显示和测量经常需要在某个特殊截面上进行，如对流场中的涡和湍流量的观察，这就需要照明光源呈薄平片状。而激光器直接发出的激光是一个发散的光斑，如果在激光器输出端加上片光源，激光束就可以透过柱型透镜而改变激光束的形状，成为一个平面内的光束，这样的平面光照在流场中，近似代表了一个平面上的流场运动状态。



图 2 激光片光源显示的圆出口自由射流纵向截面

为了增强显示效果，需要在流场中投放适当的粒子，粒子的大小和浓度要达到观察或拍摄所需的散射光强度，并且粒子能够跟踪当地空间流场的流动速度，这样用高速摄像机或数字式 CCD 可以拍摄到一定时间段内某流场平面内的流动状态。家用加湿器能够产生大量的液体微粒，这些粒子的大小比较均匀，浓度也很高，在激光束照射下，散射性能较好，使得

流动图像能够满足观察和分析的要求，同时微粒质量较轻，从加湿器出口射出后能够代表当地的流速，形成一个典型的射流场。

将激光片光源和加湿器结合起来，完全可以实现对典型射流场的流动显示，通过改变加湿器出口的喷嘴形状，可以改变射流的方向，这样可以很容易地对射流的径向和轴向截面(如图 3 所示)进行观察或纪录。

二、实验仪器和设备

1、激光片光源
2、加湿器
3、射流风洞
4、发烟机
5、坐标架
6、相机、高速摄像机或数字式 CCD

三、 实验目的和要求

要求用所给实验仪器和设备，设计圆出口自由射流流动显示的实验，拍摄出清晰的圆出口自由淹没射流纵向和横向瞬态流动结构图像，通过数字图像处理技术，测量射流核心区，射流极点、射流扩散角及初始段长度等流场特征量。通过本实验达到以下目的：

1. 用流动显示的方法直观、形象地认识圆形出口射流流场及瞬态流动结构发展、演化的特征，了解圆形出口与加齿圆形出口射流从层流、扰动失稳、转捩、到发展为湍流的过程；
2. 熟练掌握用相机、高速摄像机或数字式 CCD 拍摄记录流动图像的技术；
3. 掌握流动图像分帧、滤波去噪等图像预处理技术；
4. 了解激光片光源在流动显示中的作用；
5. 了解示踪粒子在流动显示中的作用；
6. 了解圆出口自由射流流场的瞬态流动结构特征；
7. 掌握定量测量射流核心区，射流极点、射流扩散角及初始段长度等流场特征量的数字图像处理技术；

四、问题讨论与思考

1. 拍摄曝光时间和曝光量与哪些因素有关，如何设置曝光时间、曝光量和拍摄模式能够得到最佳效果的图像？
2. 为了清晰拍摄圆出口自由射流瞬态流动结构的动态变化过程，对高速摄像机或数字式 CCD 的时间分辨率有何要求？如不满足上述要求，对拍摄的效果会有何影响？
3. 为了清晰拍摄圆出口自由射流瞬态流动不规则结构，对高速摄像机或数字式 CCD 的空间像素分辨率有何要求？
4. 对于用 CCD 拍摄的流动图像，如何得到定量的速度及涡量分布？

实验 5 单丝热线探针的标定

一、实验原理

1、热线测速原理

热线测量流速技术起源于二十世纪初，是流体力学实验技术进步的一个里程碑，它使流体力学研究者获得了测量高频非定常流动特别是湍流的有力工具。在流场中放置通过电流加热的金属细丝敏感组件时，由于电流的热效应，金属丝会产生一定的热量，如果金属丝与周围环境流体存在温差，它与周围流场就存在热交换过程，如果周围环境流体处于流动状态，热交换过程就以强迫对流为主，热线与周围环境流体的温差和流体的流速决定了强迫对流输运的热量。当热线与周围流体介质之间的热交换处于平衡状态时，电流加给热线的热量应与强迫对流输运的热量相等。周围环境流体流速的变化会导致强迫对流输运的热量变化，从而引起电流加给热线的热量的累积或亏损，进而引起敏感组件的温度变化和其电阻的变化。根据热平衡原理，任何时候热线由于温度升高所产生的热量应该等于流速上升所耗散掉的热量；反之，任何时候热线的温度降低所损失的热量应该等于流速降低所积累的热量。当加热电流保持恒定时，这种变化表现为热线两端输出电压的变化；当利用负反馈电路补偿电阻变化使电阻保持恒定时，表现为热线电流的变化和热线两端输出电压的变化。这两种情况都可以建立起流体速度与热线两端输出电压的函数对应关系。这样就可以通过测量热线两端输出电压确定环境流体的速度，这就是热线测速原理。

在热平衡过程中，涉及到流速、加热电流和热线温度（或电阻）三个基本量，它们之间有一定的对应关系：当加热电流保持恒定时，热线温度（或电阻）和流体流速之间建立了确定的函数关系，利用这个关系测量流速的方法称之为恒流法；当保持热线温度（或电阻）恒定时，热线的电流和流体流速之间建立了确定的函数关系，利用这个关系测量流速的方法称之为恒温法。根据上述两种不同原理制成的测速仪分别称为恒流式测速仪和恒温式测速仪。

恒温热线测速仪具有热惯性小，频响宽等特点。目前其频响已超过 500 千赫兹，完全满足湍流中出现的各种频率成份的需要。而恒流式热线测速仪缺乏恒温式测速仪的上述特点，它的热惯性效应比恒温式测速仪大得多，电子补偿也较困难，不过它在测量温度脉动和低湍流度上仍有很大的优越性。

在忽略热传导（热丝长径比在 100 以上），热辐射（辐射散热面积小）和自由对流（风速大于 10cm/s）的情况下，热耗散主要取决于强迫对流。在假设热线是无限长，热损耗率仅决定于垂直于热线的速度分量时，上述热平衡原理可表示成 King 公式：

$$I_w{}^2 R_w = (T_w - T_e)(A + B\sqrt{U}) \qquad (1)$$

其中：I_w——加到热线上的电流，R_w——热线电阻，T_w——热线温度，T_e——气流温度，U——气流速度，A、B 是与流体和热线有关的物理常数。

这个假设只有在层流流过放置在均匀且未受扰动的流场中的无限长的柱体时才是准确的。由热线电阻与其温度之间的关系：

$$T_w - T_e = \frac{R_w - R_e}{\alpha R_e} \tag{2}$$

其中：R_e——温度T_e时热线电阻

α——热线材料的电阻温度系数

将（5-2）代入（5-1）得：

$$I_w{}^2 R_w = \frac{R_w - R_e}{\alpha R_e}(A + B\sqrt{U}) \tag{3}$$

两端同乘R_w有：

$$I_w{}^2 R_w{}^2 = \frac{R_w{}^2 (R_w - R_e)}{\alpha R_e}(A + B\sqrt{U}) \tag{4}$$

那么，（5-4）式可以表示成

$$E^2 = A' + B'\sqrt{U} \tag{5}$$

其中　$E = I_w R_w$，$A' = \dfrac{R_w^3 A}{\alpha R_e}$，$B' = -\dfrac{R_w^2 B}{\alpha}$

由于热线探针是通过电压（E）与流速（U）的关系曲线来确定流速的，因而准确地给出 E—U 关系是测速的前提。通过实验求得 E—U 关系的过程，称之为热线探针的校准。另一方面，探针性能受其材料、制造工艺、几何尺寸、流体的物理性质、环境参数、与仪器的配合使用等多因素的影响，所以对每一支探针，在使用前都需要做校准实验。

校准工作在校准器上完成。固定探针时要求热线与喷嘴中心线垂直，到喷口距离为 1/2 喷口直径。校准可以有两种姿态。“End Flow”——即喷口中心线与探针支杆方向一致，与“Cross Flow”——即喷口中心线与探针支杆垂直，如图 2-1-1 所示。在使用探针进行测量时，要求其安装姿态与校准时一致。

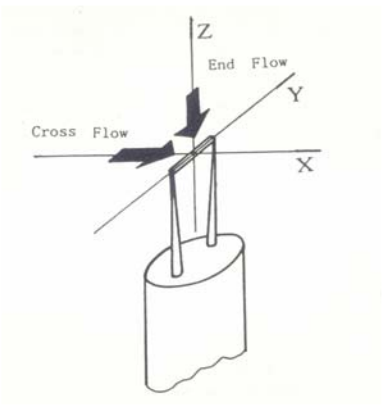


图 2-1-1　探针姿态示意图

2、压差与速度的关系

将微压计的高压输入端与校准器储气室测压孔用导管连接，低压端与环境大气相通。利用压差与流速的对应关系可以得到速度值。对于不可压流体（流速小于 100m/s），列出测压孔（位置 1）和喷嘴所在断面（位置 2）的伯努利方程，

$$\frac{p_1}{\rho_a}+gy_1=\frac{U^2}{2}+\frac{p_2}{\rho_a}+gy_2 \quad (6)$$

$y_1 \approx y_2$，再由微压计两端的压差关系 $p_1 = p_2 + \rho_w g\Delta h$，可得：

$$U=\sqrt{\frac{2\rho_w}{\rho_a}g\Delta h} \quad (7)$$

其中，U 是气流速度，ρ_a 是空气的密度，ρ_w 是水的密度，Δh 是微压计计数，单位是 mmH2O。输入环境参数与压差后，恒温热线风速仪将按照公式自动计算出相应的速度值。

二、实验仪器和设备

1、热线探针　单丝热线探针是测量流体一维速度分量的传感器，分为普通单丝热线探针（如图 2-1-2 所示，型号 TSI1210-T1.5）和边界层单丝热线探针（如图 2-1-3 所示，型号 TSI1211-T1.5 测量近壁区域的一维速度分量）两种。

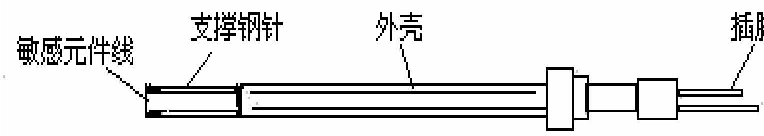


图 2-1-2　TSI1210-T1.5 单丝热线探针

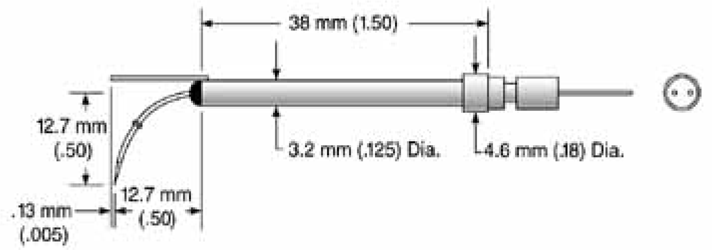


图 2-1-3　TSI1211-T1.5 单丝边界层热线探针

2、IFA-300 恒温热线风速仪

IFA(Intelligence Flow Analysis)300 恒温热线风速仪（如图 2-1-4 所示）是天津大学流体力学实验室于 1999 年从 TSI 公司购进的 1997 年产品，用于湍流的实验测量。该设备从热线标定到数据采集到数据处理都可以通过 IFA300 Thermalpro 软件实现。TSI 的新型 IFA300 恒温热线风速仪是一种计算机控制的具有自动频率最佳化功能的热线热膜风速仪，允许风速仪连续地感受流动速度并自动地调整风速仪，能够实时地实现最佳化频率响应。



图 2-1-4 IFA-300（恒温热线风速仪）

IFA300 恒温式热线风速仪的主要特点是：

1. 原理： 采用闭环 *Wheatstone* 电桥反馈控制；
2. 自动频率最佳化功能：采用 *SMARTTUNE* 最佳化电桥补偿，能够对所有测量速度自动、实时地最佳化，不需要做方波试验，操作十分简单方便；
3. 频率响应（$T1.5$ 热线）：$300kHz$，$25:1$ 电桥。对湍流和高速流能精确的测量；
4. 电阻测量和工作电阻调节： 自动测量和调节敏感元件的电阻、工作温度；
5. 最大工作电阻： $2 \sim 80\Omega$，工作在一个很宽的敏感元件变化范围；
6. 精度： $0.1\% +/- 0.01\Omega$
7. 最大探针电流：$1.6amp$， $25:1$ 电桥，可在水探针、高速流、高温流中工作；
8. 探针电缆长度： $5m$ 或 $30m$；
9. 等效放大器输入噪声： $1.7mv/Hz$ 低等效湍流强度；
10. 放大器输入漂移： $0.3uv/^{\circ}C$；

本实验用的 IFA300 恒温式热线风速仪有 4 个通道。如果用一个通道，其采样频率可设至 $714.285kHz$，使用两通道时其频率可设为 $416.666kHz$，使用三通道其频率可设为 $277.777kHz$。就其采样频率而言完全能满足湍流测量要求，而且对采集到的数据图像可以实时显示。

3、TSI1128A 型热线风速校准器

本实验中使用的单丝热线探针是由实验室的 TSI-10170 型电焊设备焊接的，因此在使用前需要进行标定。TSI-1128A 型热线风速校准器可提供流速在 0~50m/s 之间连续可调的标准流场，以标定单丝、双丝或三丝热线探针。热线探针校准器提供了一个标准的射流流场用于标定热线探针,圆射流喷口直径为 D=10mm，其校准装置示意图如图 2-1-5 所示。将它与 IFA300 相连，可实现热线探针的标定。校准器（如图 2-1-6 所示）工作过程大致如下：将自配的空气压缩机（如图 2-1-7 所示）与之相连作为气源，气体通过空气过滤器和一系列阀门进入校准器和贮气罐；调节校准器的调速旋钮，通过监视计算机上显示的速度值，使校准器射流出口速度达到所需值。将探针垂直来流放置进行标定，通过一组不同的给定流速，同时记录下对应的电压，即可得到一组流速与电压的对应关系,对实验点进行曲线拟合，即：

$$V_{eff} = K + A*E + B*E^2 + C*E^3 + D*E^4$$

系数 K、A、B、C、D 通过标定实验确定。图 2-1-8 和图 2-1-9 为 IFA300 恒温式热线风速仪对 TSI-1210T1.5 型单丝热线探针进行标定得到的电压—流速曲线。

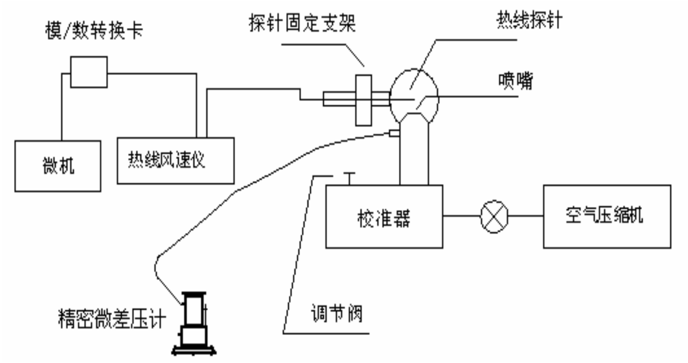


图 2-1-5　校准设备装置图

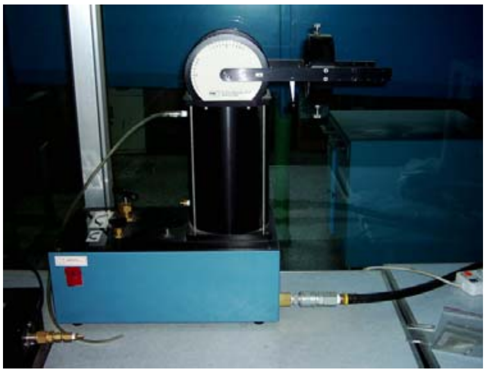


图 2-1-6　热线探针校准器



图 2-1-7　空气压缩机

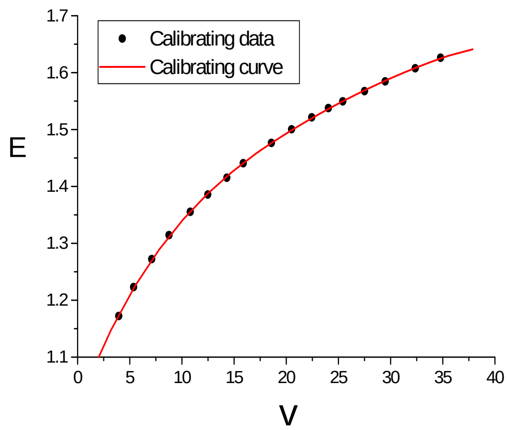


图 2-1-8 单丝热线探针标定曲线

三、实验目的和要求

要求用所给实验仪器和设备，画出实验装置图并连接实验装置，按照操作步骤进行单丝热线探针标定实验。通过本实验，达到以下目的：

1、了解热线测速的基本原理；

2、掌握单丝热线探针的标定方法；

3、掌握 TSI-1128A 型热线探针校准器的使用方法。

四、实验操作步骤

1、按实验装置图布置好仪器，将热线探针支杆固定在坐标架上。正确连接电缆，将热线探针专用电缆一端与热线探针支杆连接，另一端与热线风速仪连接，用通讯电缆将热线风速仪与计算机 com1 通讯口连接，热线风速仪输出电缆与计算机数据采集卡（A/D 卡）连接。

2、调整微压计水平仪和零刻度，用软管连接微压计和校准器的测压孔。

3、记录下环境压强和温度，检查热线风速仪电源开关，计算机电源开关均处于断开位置，接通热线风速仪电源，计算机电源，开启压缩机。

4、启动热线风速仪测速软件，进入 IFA300 软件界面，选择“Calibration”下的“Probe Data”。点击“Open Cal File”，给待标定探针命名，选择相应的参数。

“Probe Type”选择 S——单丝热线探针，

“Wire Film”选择 W——热线，

“Cal Method”选择 2——获得电压与输入压差

5、点击“Read”，连接短路帽，测量电缆电阻并保存数值。移去短路帽，安装好热线探针，测量探针冷电阻。将探针冷电阻乘以 1.5 再加上线路电阻，结果输入“Opr Res”栏。

6、点击“Gain & Offset”，转动校准器的流速调节阀，旋至合适的压差值，分别测量最低及最高流速下的压差值，计算输出电压的增益与偏置并保存。

7、点击“Calibrate”，输入环境压强与温度。选择计算速度时使用的压差单位为“mmH2O”。调整压力调节阀使斜管微压计的读数稳定在给定的压差值，输入压差，点击“Acquire”测量此时探针的桥路电压值。重复进行，直至所有校准点进行完毕。

8、点击“Next”，观察记录标定数据。

9、退出软件，关闭整理好各仪器。

10、绘制标定曲线。

五、问题讨论与思考

1、热线测速的基本原理是什么？

2、为什么要对热线探针进行校准？

3、流动方位对热线探针的标定有何影响？

实验 6 双丝热线探针的标定

一、实验原理

热线探针是测量流速的热线测速仪的传感器，测量时被放置于流场中，与流体直接进行热交换，感受流体速度信息。从物理上看，热线与流体的热交换与下列因素有关：（1）流体的速度大小；（2）速度矢量与热线之间的夹角；（3）热线与流体之间的温度差；（4）流体的物理性质；（5）热线的几何尺寸与物理性质。一般情况下，条件（3）~（5）是已知的，因此，热线测速仪输出的电压与速度矢量的大小和方向有关，也就是说，热线测速仪的输出电压 E 与流体速度矢量 U 的大小和方向之间存在着一定的对应关系。在已知这种对应关系的前提下，根据输出电压可以求出液体速度。

根据 KING 公式，影响热线的电压输出的有效制冷速度和速度分量之间具有以下关系（如图 2-2-1 所示）

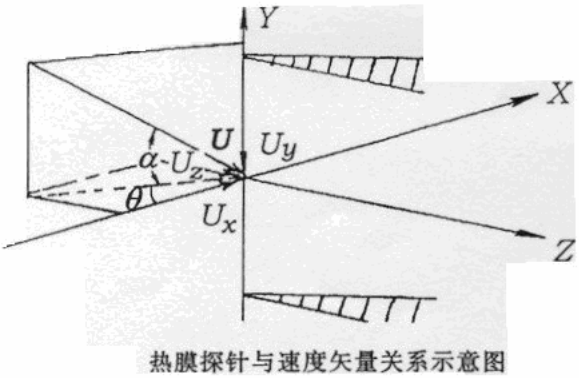


图 2-2-1

$$U_{eff}^2 = U_X^2 + k^2 U_Y^2 + h^2 U_Z^2 \quad (1)$$

$$U_{eff}^2 = |U|^2 (\cos^2\alpha\cos^2\theta + k^2\sin^2\alpha + h^2\cos^2\alpha\sin^2\theta) \quad (2)$$

其中U_{eff}为有效制冷速率，U_X为垂直于叉杆和热线敏感元件的速度分量，U_Y为平行热线敏感元件的速度分量，U_Z为平行于叉杆的速度分量，k为偏航系数（yaw coefficient），h为俯仰系数（attack coefficient），它反映沿敏感元件速度分量对对流换热的影响。一般情形$k = 0.12 \sim 0.2$。$h = 1 \sim 1.2$。

当俯仰角$\theta = 0^o$时，（1）和（2）分别简化为

$$U_{eff}^2 = U_X^2 + k^2 U_Y^2 \quad (3)$$

$$U_{eff}^2 = |U|^2 (\cos^2\alpha + k^2\sin^2\alpha) \quad (4)$$

要同时知道（3）和（4）重速度矢量的大小和方向两个未知量，必须还有一个已知条件即热线的输出电压。因此，要完整地得到速度矢量的大小和方向，必须用两个热线探针。比较常

用的是两根热线排列成互相垂直的 X 形状的探针，简称 X 形探针（如图 2-2-2 所示）。

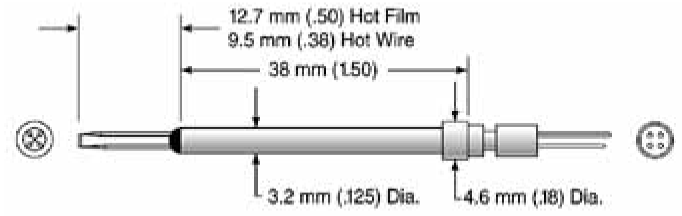


图 2-2-2(a)　TSI1240-T1.5 双丝热线探针

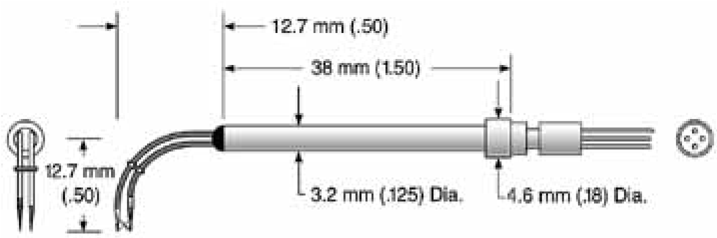


图 2-2-2(b)　TSI1243-T1.5 双丝热线探针

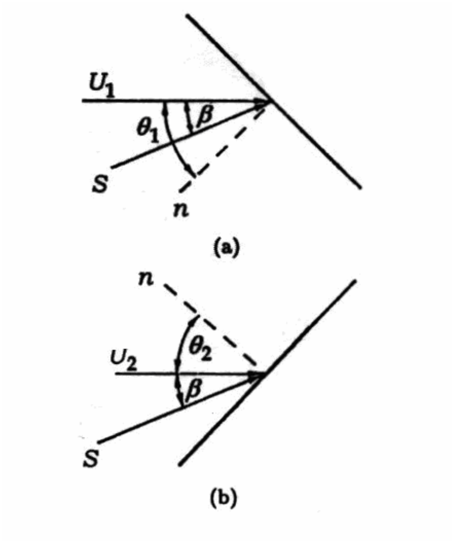


图 2-2-2(d) X 型探针测速示意图

通过测量两个热线的输出电压

$$E_1^2 = A_1(\alpha) + B_1(\alpha)\sqrt{U} \qquad (5)$$

$$E_2^2 = A_2(\alpha) + B_2(\alpha)\sqrt{U} \qquad (6)$$

联立求解方程（5）和（6）得到速度矢量大小 U 和方向角 α（图 2-2-3 所示）

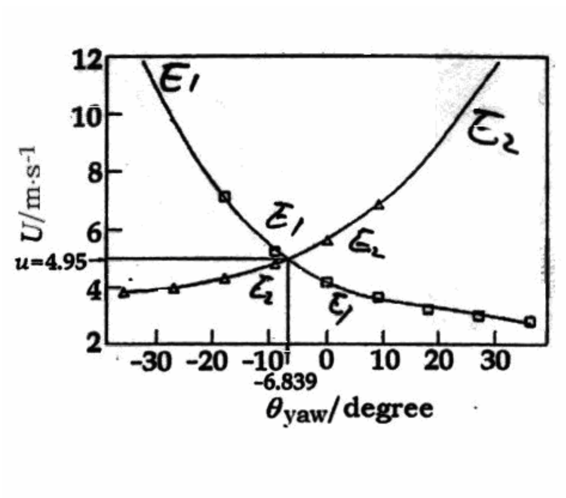


图 2-2-3 求解速度大小和方向

对于 X 形热线探针，要知道每一根热线在一定偏航角α下的E_1-U，E_2-U关系曲线，就需要对该热线在该偏航角下进行标定，得到每一根热线在一定偏航角α下的全部速度响应，拟合出系数$A(\alpha)$，$B(\alpha)$。由于 X 形热线探针的两根丝互相垂直，因此，对第一根丝在偏航角α下进行标定和对第二根丝在偏航角$90^{\mathrm{O}}-\alpha$下标定可以同时进行。通过校准每一根热线在速度变化及偏航角变化时的全部响应，得到每一根热线在不同偏航角α下的E_1-U，E_2-U关系曲线簇（5）和（6）（如图 2-2-4 所示）。在已知流速的标准流场中通过实验求得$E-U$之间对应关系的过程称为热线探针标定。在每一次测速实验中，由于受多种因素的影响，例如探针的材料、制造工艺、几何尺寸、流体的物理性质和流速范围、流场温度、实验仪器之间的差异等，$E-U$之间的关系是不一样的。因此，每一次测速实验前都要进行探针的标定。

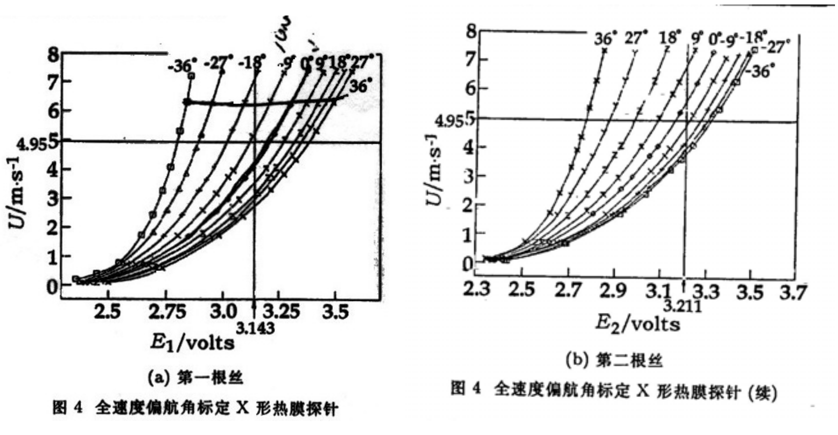


图 2-2-4 不同偏航角α下的E_1-U，E_2-U关系曲线簇

二、实验目的和要求

（1）掌握用 TSI-1128 气探针校准器标定 X 形双丝热线探针的基本原理、方法和步骤；
（2）能够画出双丝热线探针在不同偏航角下的标定曲线；
（3）根据二通道的输出电压求出速度矢量的大小和方向以及流向和法向两个速度分量。

三、实验操作步骤

（1）按照实验装置图（图 2-2-5）安装实验装置并连接实验仪器。将探针支杆用两根 5m 的 10110 型专用电缆连接，并将两根电缆的另一端插入两通道测速仪的两个探针插孔，将 1240-T1.5 双丝热线探针安装在支杆上，并将探针缩回保护套内。测速仪输出插孔与计算机数据采集卡连接，将探针支杆安装在 1128 型气探针校准单元上。

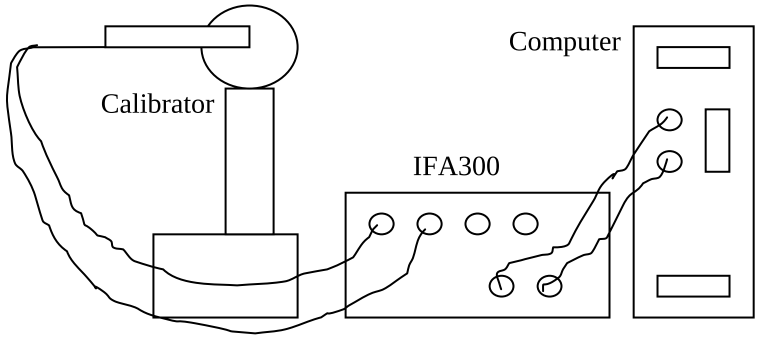


图 2-2-5 实验装置图

（2）检查测速仪的两个恒温通道，确定第一通道和第二通道已连通，接通测速仪电源预热。
（3）标定热线探头。

a. 接通气校准器电源，启动空气压缩机。
b. 旋转探针支杆，使来流在两根丝夹角的平分线位置。
c. 在测速范围内调节流量计，使流速达到所标定的最大速度。
d. 启动 IFA300/Calibtrate，设置各参数，采集数据，并将数据存入磁盘。
e. 改变流速，重复过程 d.

（4）将探针支杆向下旋转 5°，重复过程（3）。
（5）将探针缩回保护套内。将探针支杆从校准器上取下，取出探针，并放入相应盒内。将流量调到最小，关掉空气压缩机。画出两根热线标定曲线

$$E_1^2 = A_1(\alpha) + B_1(\alpha)\sqrt{U} \qquad (5)$$

$$E_2^2 = A_2(\alpha) + B_2(\alpha)\sqrt{U} \qquad (6)$$

（如图 2-2-4 所示），并用最小二乘法拟合出标定公式（5）、（6），求出 $A(\alpha)$，$B(\alpha)$ 的值。

四、问题讨论与思考

1、用 X 形热线测速应该注意避免那些因素带来的误差？
2、用 X 形热线测速与用单丝热线测速相比增加了那些困难？

实验 7 用热线风速仪测量自由射流平均速度分布

一、实验原理

自由淹没射流是日常生活和生产过程中常见的流动现象，通常可认为射流在喷口处平均速度是均匀分布，流体从喷管中喷出后，不仅沿喷管轴线方向运动，还会发生剧烈的横向运动使得射流与原来静止的流体不断掺混，进行质量与动量交换，从而带动周围的静止流体一起运动。离喷口越远，被带动的质量越多，故射流呈扩散状（如图 2-3-1 所示）。随着离喷口的距离增大，各截面上的速度分布要改变。

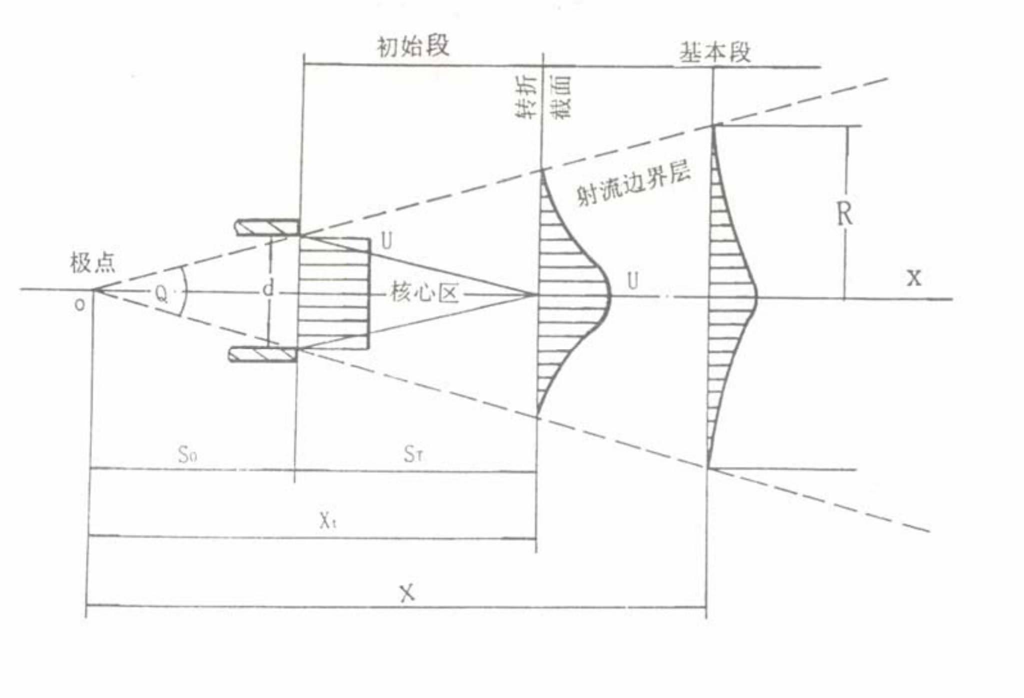


图 2-3-1 射流速度剖面示意图

二、实验目的和要求

1、用热线风速仪和单丝热线探针测量圆出口自由射流 x=0d，1d，2d，3d，4d，5d，6d 各截面上的流向平均速度，确定射流核心区，射流极点，射流扩散角及初始段长度，了解轴对称或矩形自由射流平均速度分布规律，通过热线测速认识圆形出口自由射流平均流场的发展、演化特征。

2、熟练掌握热线测速技术，学会用 IFA300 型热线风速仪和单丝热线探针精细测量圆出口自由射流不同流向、径向位置的平均速度。

3、能够编写数据处理程序，计算圆出口自由射流各截面上的平均速度。

4、能够用绘图软件描绘圆出口自由射流各截面上的流向平均速度分布曲线和不同法向位置的流向平均速度沿轴向的演化曲线。

三、实验仪器和设备

1、 射流风洞；
2、 IFA300 恒温热线风速仪；
3、 TSI1210-T1.5 单丝热线探针；
4、 三维步进电机控制坐标架；
5、 计算机及实验数据分析软件。

四、实验装置

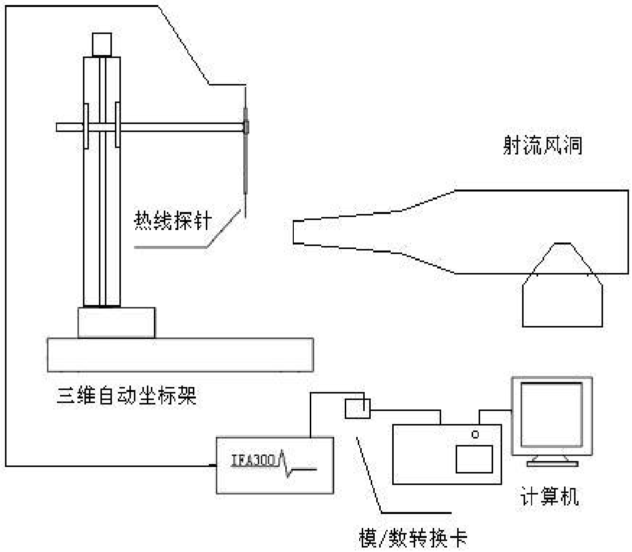


图 2-3-2 测量圆出口自由射流速度剖面实验装置图

五、实验操作步骤

1、记录基本实验参数：气温、气压、喷口几何参数 d。
2、连接实验装置，将圆形喷嘴固定在射流风洞出口上，将标定好的热线探针固定在探针支杆上，将热线探针缩入保护套内，将热线探针支杆固定在三维坐标架上，记录探针坐标。
3、将热线探针专用电缆一端与热线探针支杆连接，另一端与热线风速仪连接，用通讯电缆将热线风速仪与计算机 com1 通讯口连接，热线风速仪输出电缆与计算机数据采集卡（A/D 卡）连接，用通讯电缆将三维步进电机坐标架控制器与计算机 com2 通讯口连接。
4、检查风洞电源开关，热线风速仪电源开关，步进电机坐标架控制器电源开关，计算机电源开关均处于断开位置，接通风洞电源，热线风速仪电源，步进电机坐标架控制器电源，计算机电源。调整坐标架，使探针到达第一个测量点位置，调节风洞至所需要的风速。
5、启动热线风速仪测速软件，进入 IFA_300 软件界面，调入测量点空间位置坐标文件，调入热线探针文件，调入三维步进电机坐标架驱动程序。
6、选择“Acquisition”下的“Probe Table”，点击“Add Probe”选取相应的探针标定文件。点击“Get File”，为实验记录文件命名。点击“Next”，在新窗口中输入大气压。“Mode”

项选择“Write Only”，指定每个测点测量的频率与样本点数。

7、点击“Acquire”，进行空间逐点连续测量。

8、结束实验，将风洞调至最低风速，关闭风洞电源，热线风速仪电源，步进电机坐标架控制器电源。卸下热线探针放入探针盒中，将热线探针支杆插入保护套内，整理仪器设备。

9、处理实验数据，利用 IFA_300 软件将测量到的电压信号转换为速度信号。

10、编写实验数据分析处理程序，计算各测点平均速度。描绘平均流场图，如图 2-3-3 所示，编写实验报告。

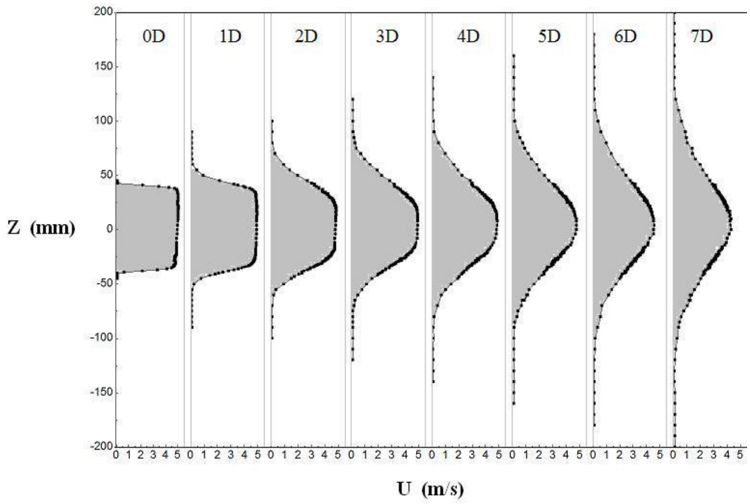


图 2-3-3　圆射流 0—7D 各截面的流向速度剖面分布

六、问题讨论与思考

1、 射流各截面的质量流量是否相等？
2、 射流边界上流体速度是否永远为零？
3、 圆出口射流核心区长度与哪些因素有关？
4、 如何根据平均速度剖面测量圆出口射流核心区长度？
5、 如何确定射流中心线的位置？

实验 8 用热线风速仪测量自由射流湍流度和雷诺应力分布（选作）

一、实验原理

流体从喷管中喷出后，不仅沿喷管轴线方向运动，还会发生剧烈的横向运动使得射流与原来静止的流体不断掺混，进行质量与动量交换，从而带动周围的静止流体一起运动。观察自由射流的瞬时流动，可以看到瞬态流动结构是极不规则的（如图 2-4-1 所示）。

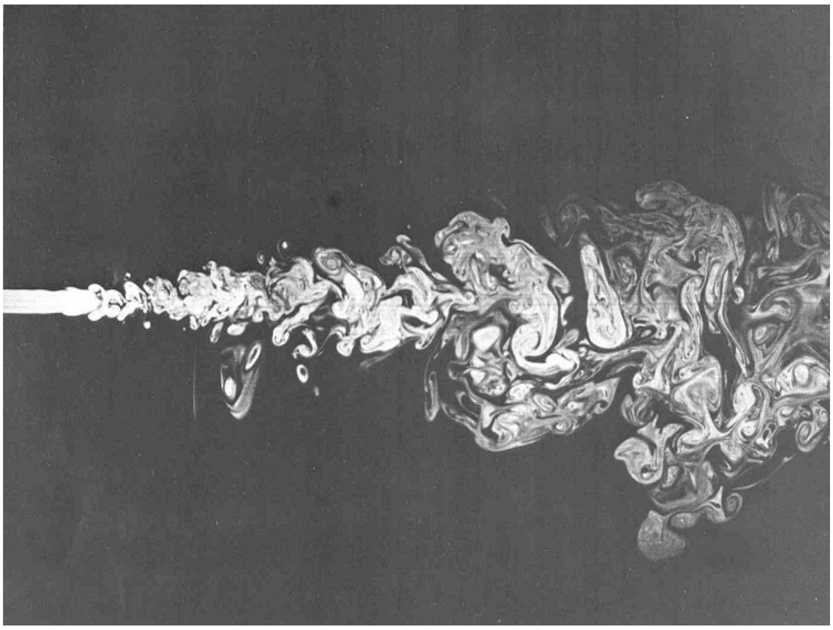


图 2-4-1 圆出口自由射流瞬态不规则流动结构

为了比较气流的脉动程度，引进了湍流度的概念，湍流度表征了脉动相对于平均速度的强烈程度。各个方向上的相对湍流度定义为：

纵向：$\varepsilon_1 = \sqrt{\overline{u'^2}}\,/U$

法向：$\varepsilon_2 = \sqrt{\overline{v'^2}}\,/U$

横向：$\varepsilon_3 = \sqrt{\overline{w'^2}}\,/U$

u' v' w' 为脉动速度的三个分量，U 为时均速度。

在实验中采用了 IFA300 和 TSI-1240、 TSI-1241 型双丝热线探针测量了 ε_1 和 ε_2 沿射流轴线的分布。测量结果如图 2-4-2 所示。

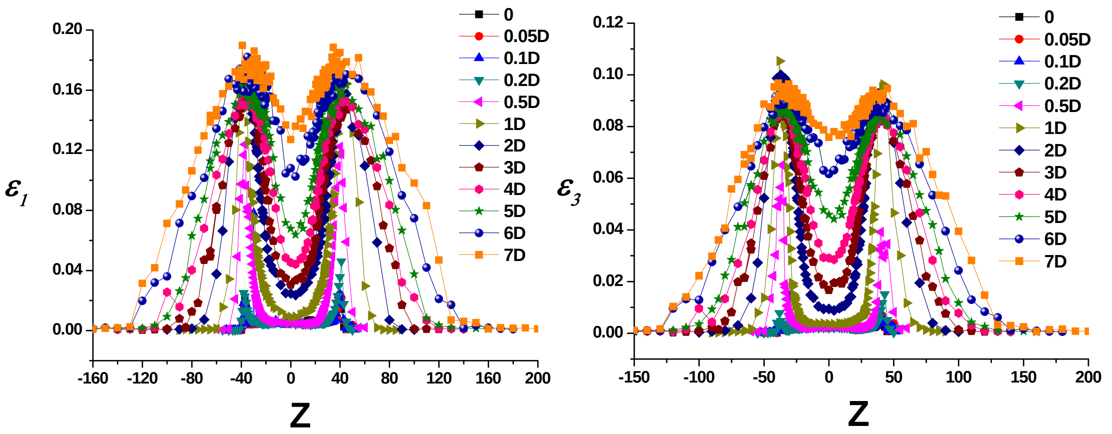


图 2-4-2　流场不同流向位置处的湍流度分量分布剖面

雷诺应力$-\rho < u_i^{'} u_j^{'} >$是空间一点两个脉动速度分量的关联，在湍流运动中，雷诺应力是不可忽略的重要部分。它表示湍流脉动产生的动量通量的平均值。也正是雷诺应力项的存在，导致了湍流控制方程的不封闭。因此，雷诺应力项的测量对于湍流的研究，特别是湍流模式理论的研究意义重大。由于使用双丝热线，本试验中对于流场的雷诺应力分量分布进行了测量。雷诺应力分布如图 2-4-3 所示。对于由流向脉动速度和径向脉动速度关联产生的雷诺应力分量$-\rho < u^{'} w^{'} >$，由于径向速度沿直径分布的反对称性，该雷诺应力分量也同样具有反对称分布的特性。

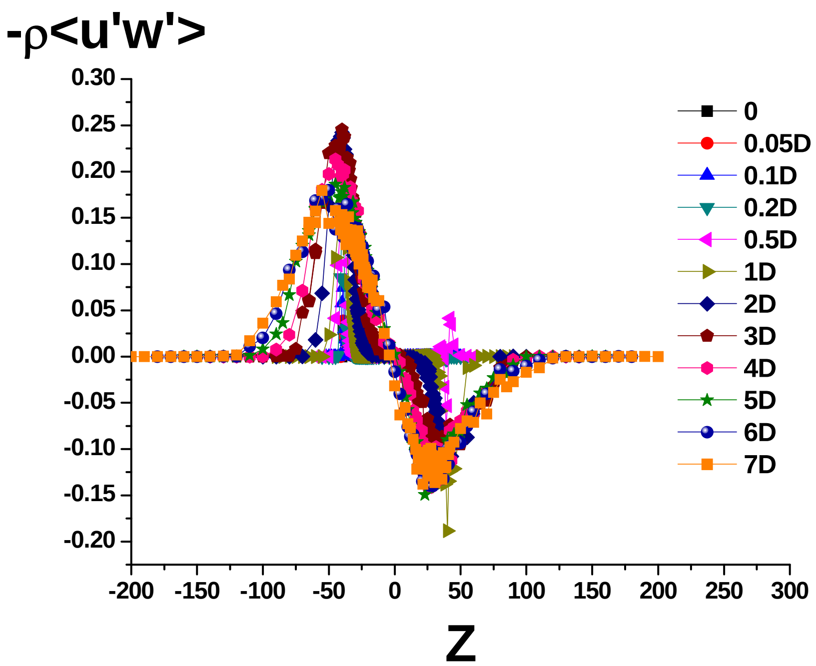


图 2-4-3　流场不同流向位置处的雷诺应力分量分布剖面

二、实验目的和要求

1、 用热线风速仪和双丝热线探针测出圆出口自由射流 x=0d，1d，2d，3d，4d，5d，6d 各截面上的湍流度和雷诺应力分布曲线，了解圆形出口自由射流的湍流度和雷诺应力分布规律。

2、 熟练掌握热线测速技术，学会用 IFA300 型热线风速仪和双丝热线探针精细测量圆出口自由射流不同流向、径向位置的二维瞬时速度时间序列信号。

3、 能够编写数据处理程序，计算圆出口自由射流各截面上的湍流度和雷诺应力。

4、 能够用绘图软件描绘圆出口自由射流各截面上的湍流度和雷诺应力分布曲线和不同法向位置的湍流度和雷诺应力沿轴向的演化曲线。

三、实验仪器和设备

1、 低速射流风洞及圆形出口射流喷嘴；

2、 IFA300 型热线风速仪和已经标定的 TSI-1240-T1.5、TSI-1241-T1.5×形热线探针；

3、 三维步进电机控制坐标架；

4、 计算机及实验数据分析软件。

四、实验装置

本实验采用 VEB 型小型吹入式直流射流风洞作为湍射流的发生装置，如图 2-4-4 所示。该射流风洞由轴流风扇动力系统、前直管段、两级收缩段以及直管喷口等几部分组成。其喷口直径 D 为 80mm，出口流速在 0～30m/s 之间连续可调。

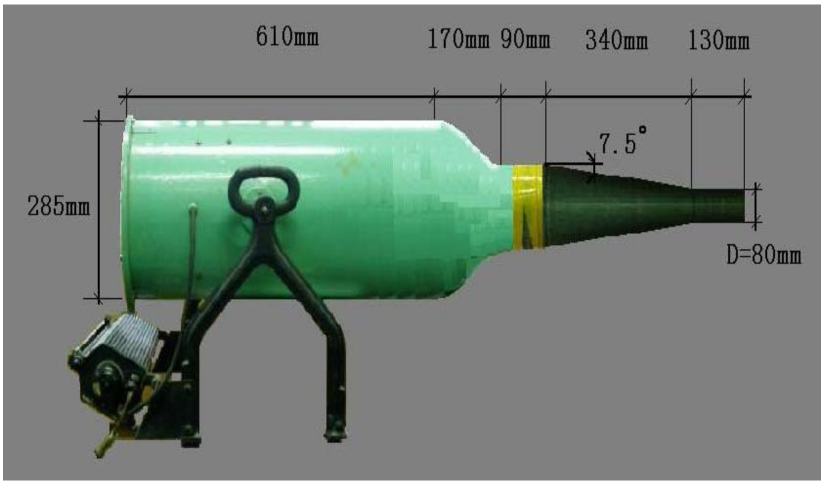


图 2-4-4. VEB 型小型吹入式直流射流风洞

五、实验操作步骤

1、记录基本实验参数：气温、气压、喷口几何参数 d。

2、连接实验装置，将圆形喷嘴固定在风洞出口上，将热线探针支杆插入保护套内，将标定好的双丝热线探针固定在探针支杆上，将热线探针支杆固定在坐标架上，记录探针坐标。

3、将热线探针专用电缆一端与热线探针支杆连接，另一端与热线风速仪连接，用通讯电缆

将热线风速仪与计算机 com1 通讯口连接，热线风速仪输出电缆与计算机数据采集卡（A/D 卡）连接，用通讯电缆将三维步进电机坐标架控制器与计算机 com2 通讯口连接。

4、检查风洞电源开关，热线风速仪电源开关，步进电机坐标架控制器电源开关，计算机电源开关均处于断开位置，接通风洞电源，热线风速仪电源，步进电机坐标架控制器电源，计算机电源。调整坐标架，使探针到达第一个测量点位置，调节风洞至所需要的风速，

5、启动热线风速仪测速软件，进入 IFA_300 软件界面，调入测量点空间位置坐标文件，调入热线探针文件，调入三维步进电机坐标架驱动程序。

6、选择“Acquisition”下的“Probe Table”，点击“Add Probe”选取相应的探针标定文件。点击“Get File”，为实验记录文件命名。点击“Next”，在新窗口中输入大气压。“Mode”项选择“Write Only”，指定每个测点测量的频率与样本点数。

7、点击“Acquire”，进行空间逐点连续测量。

8、结束实验，将风洞调至最低风速，关闭风洞电源，热线风速仪电源，步进电机坐标架控制器电源。卸下热线探针放入探针盒中，将热线探针支杆插入保护套内，整理仪器设备。

9、处理实验数据，利用 IFA_300 软件将测量到的电压信号转换为速度信号。

10 编写实验数据分析处理程序，计算各测点平均速度。描绘平均流场图，如图 2-4-2、2-4-3 所示，编写实验报告。

六、问题讨论与思考

1、分析圆出口自由射流平均速度剖面与湍流度和雷诺应力剖面的关系。

2、为什么圆出口自由射流的湍流度和雷诺应力最大位置在射流边界处？

3、为了增强自由射流与周围环境流体的混合或者减小射流喷嘴的噪声，常常在射流边界处安装旋涡发生器，试解释其原因。

4、举例说明增强自由射流与周围环境流体混合的工程应用实例。

实验 9 用热线风速仪测量平板湍流边界层平均速度剖面(选作)

一、实验原理

湍流边界层是工程技术中典型的湍流流动形态之一，是指粘性流体流经固体表面一定阶段后，由于流动不稳定性的作用，在固体表面附近的区域内发展成为平均速度随法向空间坐标变化很快（梯度很大）而瞬时流动又极端混乱的流体流动状态（如图 2-10-1、2-10-2 所示）。工程技术中大量的湍流问题与湍流边界层密切相关，如水轮机、汽轮机叶片表面附近的流动，航空器固壁表面附近的流动，发动机进气道内的流动等。相对于层流边界层，湍流边界层使得壁面摩擦阻力大幅度增加，壁面烧蚀严重，能耗增大，壁面振颤加剧，机械效率下降，从而对系统和结构物的安全可靠性构成严重威胁。其中固壁表面摩擦阻力在各种运输工具中的总阻力中占有很大的比例，例如：常规的运输机和水上船只，其表面摩擦阻力约占总阻力的 50%；对于水下运动的物体如潜艇，这个比例可达到 70%；而在长距离管道输送中，泵站的动力消耗几乎全部用于克服壁面摩擦阻力。在这些运输工具表面的大部分区域，流动都处于湍流状态，因此，从机理上分析湍流边界层中的流动结构及其形成原因，进而提出控制湍流边界层的有效方法成为湍流研究的前沿课题。而控制湍流边界层的主要目的之一就是减小壁面摩擦阻力，降低能耗，所以研究湍流边界层意义重大。

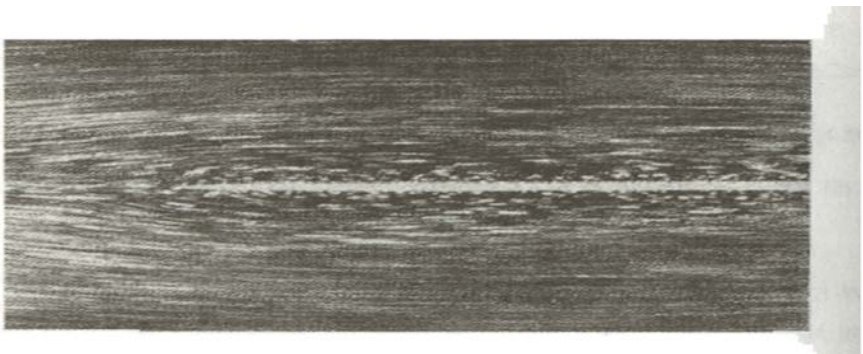


图 2-10-1 用铝粉流动显示的平板湍流边界层

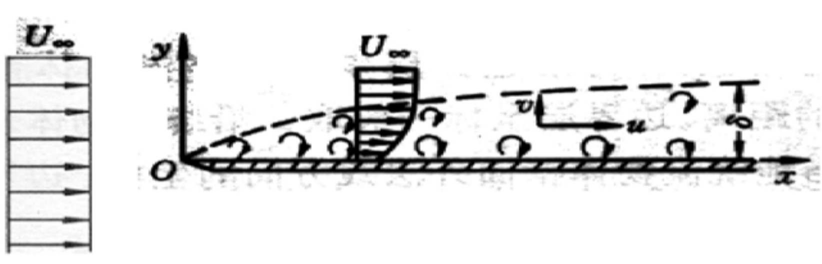


图 2-10-2 平板湍流边界层示意图

湍流边界层是一种多层结构，沿壁面法向不同距离各区域内的流动特性各不相同。可以将边界层流场分成两个区域，一个是靠近壁面的区域，其流动直接受壁面条件的影响，此区域称为壁区。壁区外的区域只是间接受到壁面剪应力的影响，称为外区。外区以外为可以忽略流体黏性的主流区。

如果壁面是完全光滑的，根据流动特性的不同，壁区又分为三个子层，即黏性底层，缓冲层和完全湍流层。黏性底层是最靠近壁面的一个薄层，它的流动特性受固壁黏性剪应力的影响，流场主要由黏性控制，称其为黏性底层。在黏性底层外和壁区内，惯性作用相对于流体的黏性作用越来越强，直到离开壁面一定距离后，流场变为完全湍流，这时起主导作用的主要是惯性，而黏性的影响可以忽略，称为完全湍流层，因为该区域流向平均速度符合对数律，又称作对数律层。在这两个子层之间，还存在一个过渡层，在该层内湍流的惯性作用与黏性作用几乎相当，称为缓冲层。实际上在壁区的这三个子层的流动特性是逐渐变化的，并没有明显的分界线。壁区也称为内层，该区域的湍流流动称为壁湍流。

湍流边界层近壁区域在湍流边界层中占有特别重要的地位。据测量，湍流动量产生率在壁面附近最高，随着法向位置远离壁面，湍流动量产生率急剧下降，在湍流边界层 0.2 倍边界层厚度处已经几乎为零。而累积在湍流边界层 0.2 倍边界层厚度内近壁区域产生的湍流动量占整个边界层湍流动量产生的 90%（如图 2-10-3 所示）。

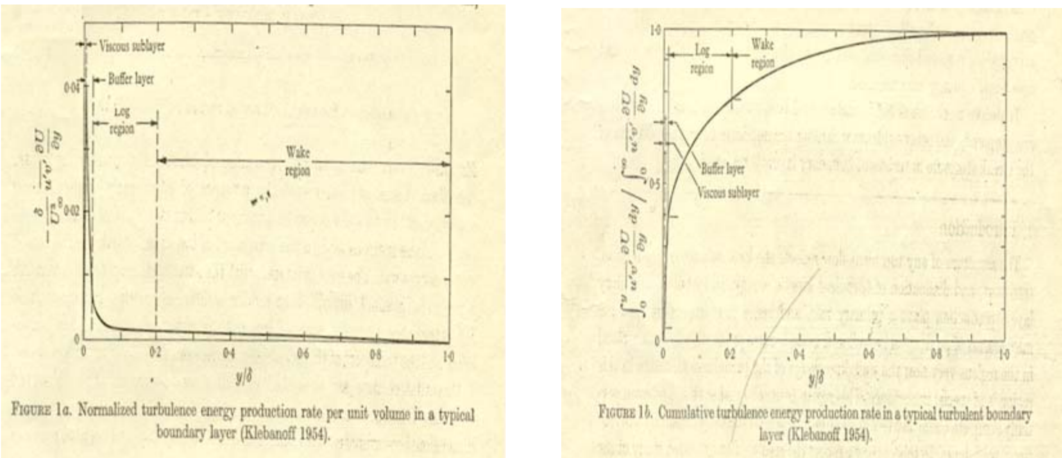


图 2-10-3 湍流边界层内湍流动量产生率分布

湍流边界层近壁区域黏性底层内的流速分布为：

$$\frac{U}{u_*}=u^+=y^+=\frac{yu_*}{\nu} \qquad 0\le y^+\le 5 \tag{1}$$

湍流边界层近壁区域的对数律平均速度剖面与壁面摩擦速度 u_*、黏性系数 ν 等内尺度物理量密切相关，其中，U 为平均流速，ν 是运动黏性系数，u_* 为壁面摩擦速度。湍流边界层近壁区域的对数律平均速度剖面（如图 2-10-4 所示）表达式为：

$$\frac{U}{u_*} = A\ln\frac{yu_*}{\nu} + B \qquad 30 \le y^+ \le 300 \qquad (2)$$

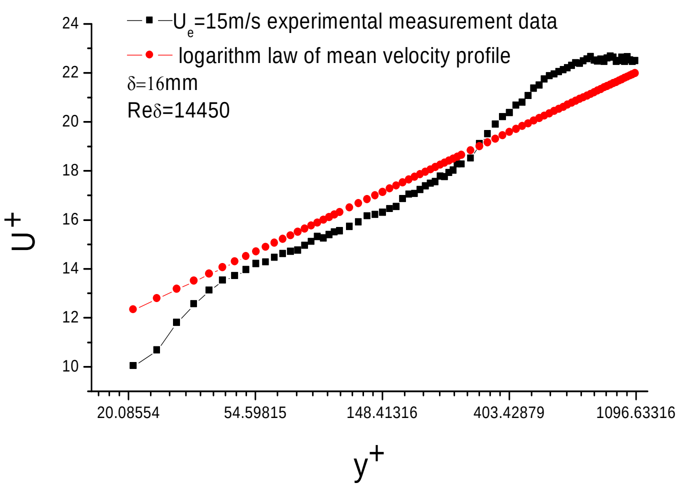


图 2-10-4 湍流边界层近壁区域对数律平均速度剖面

湍流边界层近壁区域的流向平均速度沿边界层法向分布剖面的测量是一项比较成熟的技术，经过近一百年的研究和探索，其近壁区域的线性律和对数律平均速度剖面已经得到公认。特别是近三十年来，热线测速技术（HWA）的广泛使用和激光测速技术(LDA)的成熟与发展，实现了对湍流边界层近壁区域流场微小干扰或无干扰的平均速度剖面高时间分辨率测量。

二、实验目的和要求

1、用热线风速仪和单丝边界层热线探针测量平板湍流边界层不同法向位置的流向平均速度，了解平板湍流边界层平均速度剖面分布规律，通过热线测速认识平板湍流边界层的亚层分层结构。

2、熟练掌握热线测速技术，学会用 IFA300 型热线风速仪和单丝边界层热线探针精细测量平板湍流边界层不同法向位置的流向平均速度。

3、能够编写数据处理程序，计算平板湍流边界层不同法向位置的流向平均速度，在准确测量湍流边界层近壁区域对数律平均速度剖面的基础上，用最小二乘法拟合平板湍流边界层内尺度无量纲平均速度剖面各参数。

4、能够用绘图软件描绘平板湍流边界层内尺度无量纲平均速度分布曲线。

三、实验仪器和设备

1、低速回流风洞或空气动力学多功能实验台；

2、平板模型；

3、IFA300 热线风速仪和已经标定的 TSI1211-T1.5 边界层单丝热线探针（如图 2-10-5 所示）；

4、三维步进电机控制坐标架；

5、计算机及实验数据分析处理软件。

四、实验操作步骤

1、记录基本实验参数：气温、气压。

2、连接实验装置，将标定好的单丝边界层热线探针固定在探针支杆上，将热线探针支杆固定在三维坐标架上，记录探针坐标。

3、将热线探针专用电缆一端与热线探针支杆连接，另一端与热线风速仪连接，用通讯电缆将热线风速仪与计算机 com1 通讯口连接，热线风速仪输出电缆与计算机数据采集卡（A/D 卡）连接，用通讯电缆将三维步进电机坐标架控制器与计算机 com2 通讯口连接。

4、检查风洞电源开关，热线风速仪电源开关，步进电机坐标架控制器电源开关，计算机电源开关均处于断开位置，接通风洞电源，热线风速仪电源，步进电机坐标架控制器电源，计算机电源。调整坐标架，使探针到达距离平板前端 x=1000mm 处近壁第一个测量点位置，调节风洞至所需要的风速，

5、启动热线风速仪测速软件，进入 IFA_300 软件界面，调入测量点空间位置坐标文件，调入热线探针文件，调入三维步进电机坐标架驱动程序。

6、选择“Acquisition”下的“Probe Table”，点击“Add Probe”选取相应的探针标定文件。点击“Get File”，为实验记录文件命名。点击“Next”，在新窗口中输入大气压。“Mode”项选择“Write Only”，指定每个测点测量的频率与样本点数。

7、点击“Acquire”，将 TSI-1243 型单丝边界层热线探针沿法向从距壁面小于 0.5mm 处向上移动，进行空间逐点连续测量。

8、结束实验，将风洞调至最低风速，关闭风洞电源，热线风速仪电源，步进电机坐标架控制器电源。卸下热线探针放入探针盒中，将热线探针支杆插入保护套内，整理仪器设备。

9、处理实验数据，利用 IFA_300 软件将测量到的电压信号转换为速度信号。

10、编写实验数据分析处理程序，计算各测点平均速度，按照流程图 2-10-6 用最小二乘法迭代拟合内尺度无量纲平均速度剖面的参数 A、B、u_*，绘制无量纲化速度剖面，编写实验报告。

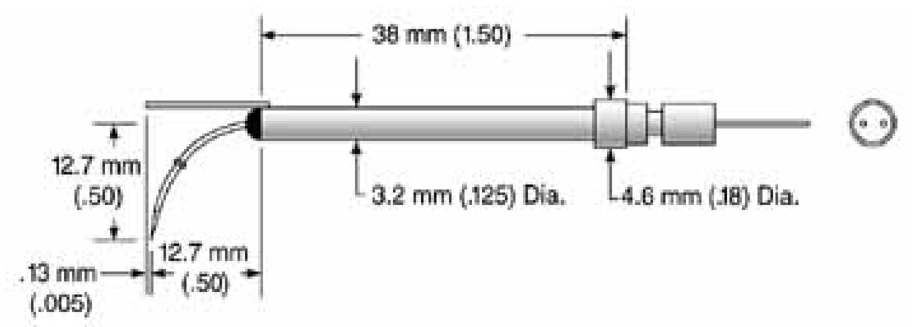


图 2-10-5　TSI1211-T1.5 单丝边界层热线探针

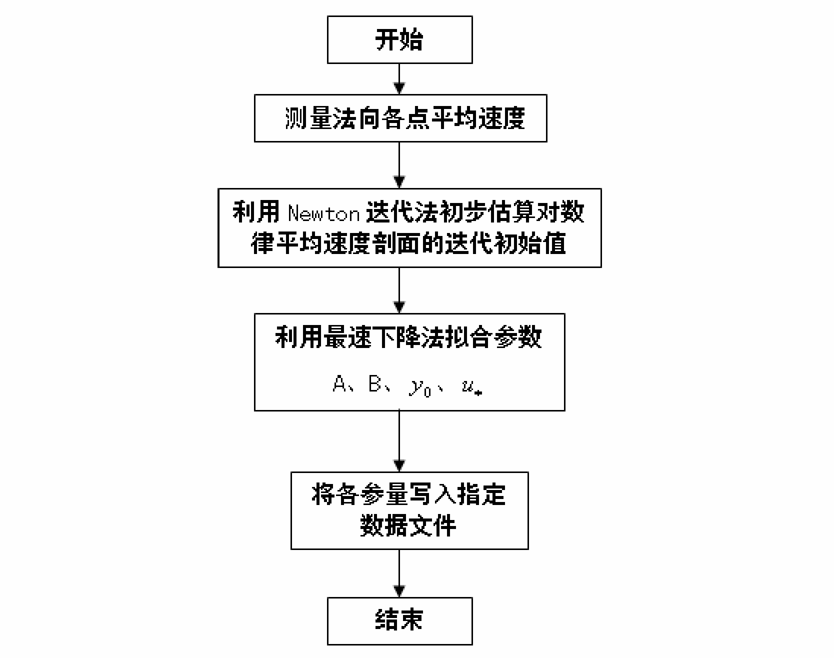


图 2-10-6 迭代拟合平板湍流边界层内尺度无量纲平均速度剖面的参数 A、B、u_* 流程图

实验 10 平板湍流边界层雷诺应力分布的测量（选作）

一、实验原理

在湍流研究的早期，认为湍流边界层距离壁面最近的粘性底层由于粘性起主要作用而处于层流状态，因此粘性底层又被称为层流底层。二十世纪中叶，随着流体力学实验技术的发展，能够对湍流进行比较细致的观察和研究，从而深入研究湍流的发生、发展和演化过程。Corrsin & Kistler (1954)[14]在湍流边界层中发现了间歇现象，Townsend(1956) [15]指出在剪切湍流中存在着小尺度脉动及具有准周期的大尺度结构，并提出了湍流结构的概念。Townsend (1956) ， Favre (1958) ,Grant(1959) 在湍流边界层外区发现了大尺度涡的运动。Einstein (1956)[16] ， Kline & Runstaler(1959) [17]等用流动显示的方法在湍流边界层的近壁区观察到了具有明显周期性的流体喷射的大尺度运动。观察湍流边界层的瞬时流动，可以看到具有明显周期性的大尺度运动（如图 2-11-1、2-11-2、2-11-3 所示）。种大尺度运动的强度、尺度和结构形态对一定类型的流动具有普遍性和可重复性，因而被称为相干结构（亦称拟序结构）。相干结构的猝发过程在局部范围内对瞬时雷诺应力具有很大的贡献，其中喷射和扫掠是猝发中最重要的两个方面。现在已经公认，湍流边界层粘性底层的流动并不是层流，而是由相干结构的猝发引起的周期性的大尺度运动。湍流边界层近壁区域相干结构是湍流中最重要的结构。它对湍流的产生、维持、演化和发展起着重要的作用。湍流边界层近壁区域在湍流边界层中占有特别重要的地位。边界层中的湍流主要是由近壁区域相干结构的猝发产生的。

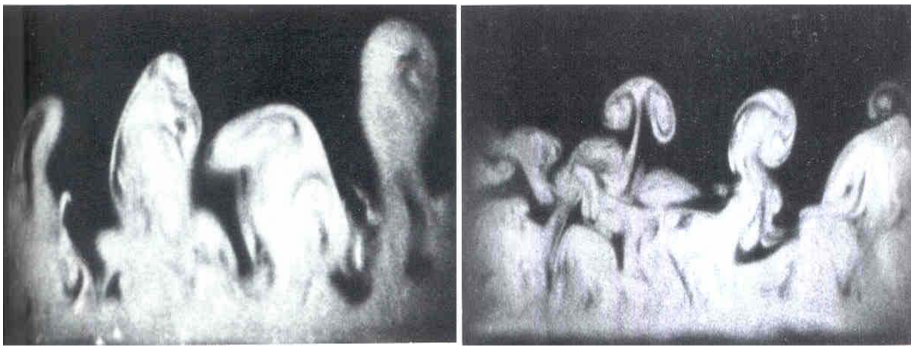
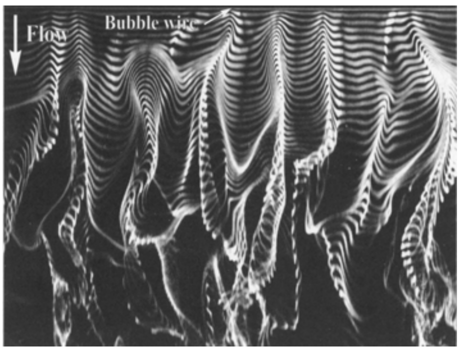


图 2-11-1 相干结构流动显示端视图



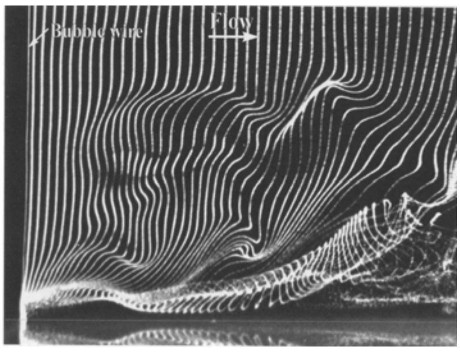


图 2-11-2 相干结构流动显示俯视图　图 2-11-3 相干结构流动显示侧视图

实验中采用 IFA300 恒温热线风速仪和 TSI-1240、 TSI-1243 型双丝热线探针测量平板湍流边界层湍流度 ε_1、 ε_2、 ε_3 沿壁面法向的分布。测量结果如图 2-11-4、2-11-5 所示。

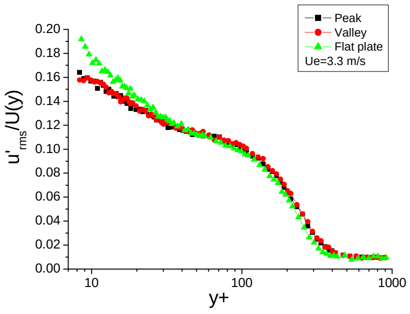


图 2-11-4 流向湍流强度沿湍流边界层法向的分布

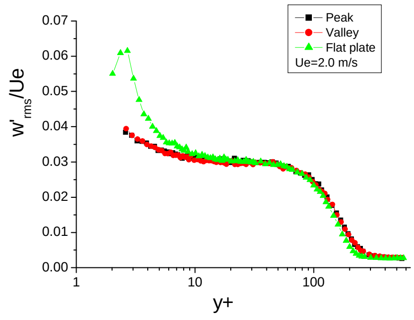
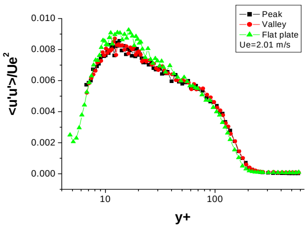
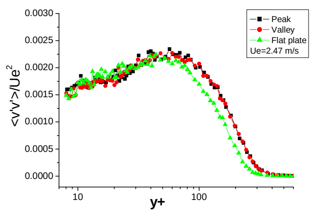


图 2-11-5 流向湍流强度沿湍流边界层法向的分布

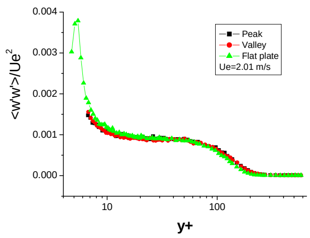
雷诺应力 $-\rho<u_i^{'}u_j^{'}>$ 是空间一点两个脉动速度分量的关联，在湍流运动中，雷诺应力是不可忽略的重要部分。它表示湍流脉动产生的动量通量的平均值。也正是雷诺应力项的存在，导致了湍流控制方程的不封闭。因此，雷诺应力项的测量对于湍流的研究，特别是湍流模式理论的研究意义重大。由于使用双丝热线，本试验中对于流场的雷诺应力分量分布进行了测量。雷诺应力分量剖面如图 2-11-6 所示。



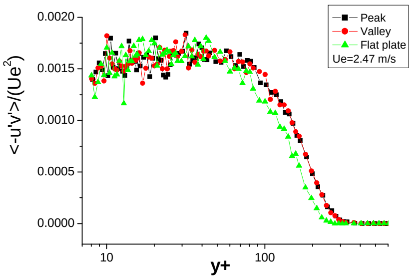
$<u'u'>/Ue^2$



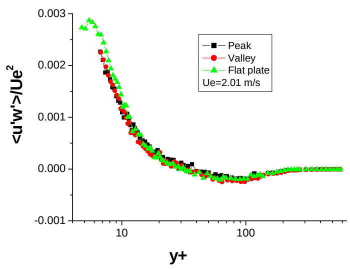
$<v'v'>/Ue^2$



$<w'w'>/Ue^2$



$<-u'v'>/Ue^2$



$<u'w'>/Ue^2$

图 2-11-6 各雷诺应力分量沿湍流边界层法向的分布

二、实验目的和要求

1、 用热线风速仪和双丝热线探针测量平板湍流边界层的湍流度和雷诺应力分布曲线，了解平板湍流边界层的湍流度和雷诺应力分布规律。

2、 熟练掌握热线测速技术，学会用 IFA300 型热线风速仪和双丝热线探针精细测量平板湍流边界层不同法向位置的二维瞬时速度时间序列信号。

3、 能够编写数据处理程序，计算平板湍流边界层不同法向位置的湍流度和雷诺应力。

4、 能够用绘图软件描绘平板湍流边界层不同法向位置的湍流度和雷诺应力分布曲线。

三、实验仪器和设备

1、 低速风洞；2、平板模型；3、IFA300 型热线风速仪 4、已经标定的 TSI-1243-T1.5×形热线探针；5、三维步进电机控制坐标架；6、计算机及实验数据分析软件。

四、实验操作步骤

1、记录基本实验参数：气温、气压、测点流向位置。

2、连接实验装置，安装实验平板模型，将标定好的双丝热线探针固定在探针支杆上，将热线探针支杆固定在坐标架上，记录探针坐标。

3、将热线探针专用电缆一端与热线探针支杆连接，另一端与热线风速仪连接，用通讯电缆将热线风速仪与计算机 com1 通讯口连接，热线风速仪输出电缆与计算机数据采集卡（A/D 卡）连接，用通讯电缆将三维步进电机坐标架控制器与计算机 com2 通讯口连接。

4、检查风洞电源开关，热线风速仪电源开关，步进电机坐标架控制器电源开关，计算机电源开关均处于断开位置，接通风洞电源，热线风速仪电源，步进电机坐标架控制器电源，计算机电源。调整坐标架，使探针到达第一个测量点位置，调节风洞至所需要的风速，

5、启动热线风速仪测速软件，进入 IFA_300 软件界面，调入测量点空间位置坐标文件，调入热线探针文件，调入三维步进电机坐标架驱动程序。

6、选择“Acquisition”下的“Probe Table”，点击“Add Probe”选取相应的探针标定文件。点击“Get File”，为实验记录文件命名。点击“Next”，在新窗口中输入大气压。“Mode”项选择“Write Only”，指定每个测点测量的频率与样本点数。

7、点击“Acquire”，将 TSI-1243 型双丝边界层热线探针沿法向进行空间逐点连续测量。

8、结束实验，将风洞调至最低风速，关闭风洞电源，热线风速仪电源，步进电机坐标架控制器电源。卸下热线探针放入探针盒中，整理仪器设备。

9、处理实验数据，利用 IFA_300 软件将测量到的电压信号转换为速度信号。编写实验数据分析处理程序，编写实验报告。

五、问题讨论与思考：

1、分析平板湍流边界层平均速度剖面与湍流度和雷诺应力剖面的关系。

2、为什么平板湍流边界层的湍流度和雷诺应力最大位置在固壁边界附近？

实验 11 平板湍流边界层壁面摩擦阻力的测量（选作）

一、实验原理

目前工程中常用的测量壁面摩擦阻力的方法主要有天平直接测力法、斯坦顿（Stanton）管、普列斯顿（Preston）管、底层隔板法等[1]-[5]，这些方法的一个共同缺陷是操作复杂，都需要对湍流边界层的壁面进行不同程度的破坏，如安装天平测力装置、镶嵌传感器、开孔、插管等，这些或多或少地改变了湍流边界层壁面附近原有的流场条件，从而影响测量的真实性、可靠性和准确性。

湍流边界层近壁区域的流向平均速度沿边界层法向分布剖面的测量是一项比较成熟的技术，经过近一百年的研究和探索，其近壁区域的线性律和对数律平均速度剖面已经得到公认。特别是近三十年来，热线测速技术（HWA）的广泛使用和激光测速技术(LDA)的成熟与发展，实现了对湍流边界层近壁区域流场微小干扰或无干扰的平均速度剖面高时间分辨率测量。

湍流边界层近壁区域黏性底层内的流速分布为：

$$\frac{U}{u_*}=u^+=y^+=\frac{yu_*}{\nu} \tag{1}$$

湍流边界层近壁区域的对数律平均速度剖面为：

$$\frac{U}{u_*}=A\ln\frac{yu_*}{\nu}+B \tag{2}$$

湍流边界层近壁区域的对数律平均速度剖面与壁面摩擦速度 u_*、黏性系数 ν 等内尺度物理量密切相关，其中，U 为平均流速，ν 是运动黏性系数，u_* 为壁面摩擦速度，它与壁面摩擦切应力 τ_w 的关系为：

$$\tau_w=\rho {u_*}^2 \tag{3}$$

壁面摩擦切应力 τ_w 与阻力系数 $\mathrm{C_f}$ 的关系为：

$$\mathrm{C_f}=\tau_\mathrm{w}\big/(\rho \mathrm{U}_\infty^2/2)=2(\mathrm{u}_*/\mathrm{U}_\infty)^2 \tag{4}$$

采用平均速度剖面法测量平板湍流边界层的壁面摩擦阻力。该方法通过测量湍流边界层近壁区域平均速度剖面并拟合对数律（2）式，测量湍流边界层的壁面摩擦速度 u_*，从而测量壁面摩擦阻力 τ_w 和壁面摩擦系数 $\mathrm{C_f}$。该方法属于壁面摩擦阻力的间接测量，不需要在流场中安装复杂的摩阻天平等测量装置，不需要对固壁表面进行钻孔、镶嵌测力传感器等破坏，不会影响固壁表面附近区域原有的流场，因而在保证较高的准确性基础上，同时又具有很高的实用性。

在准确测量湍流边界层近壁区域对数律平均速度剖面的基础上，通过迭代拟合其中的参数 A、B、u_*、y_0，其中 y_0 为法向坐标误差修正值。其计算程序的流程图如下：

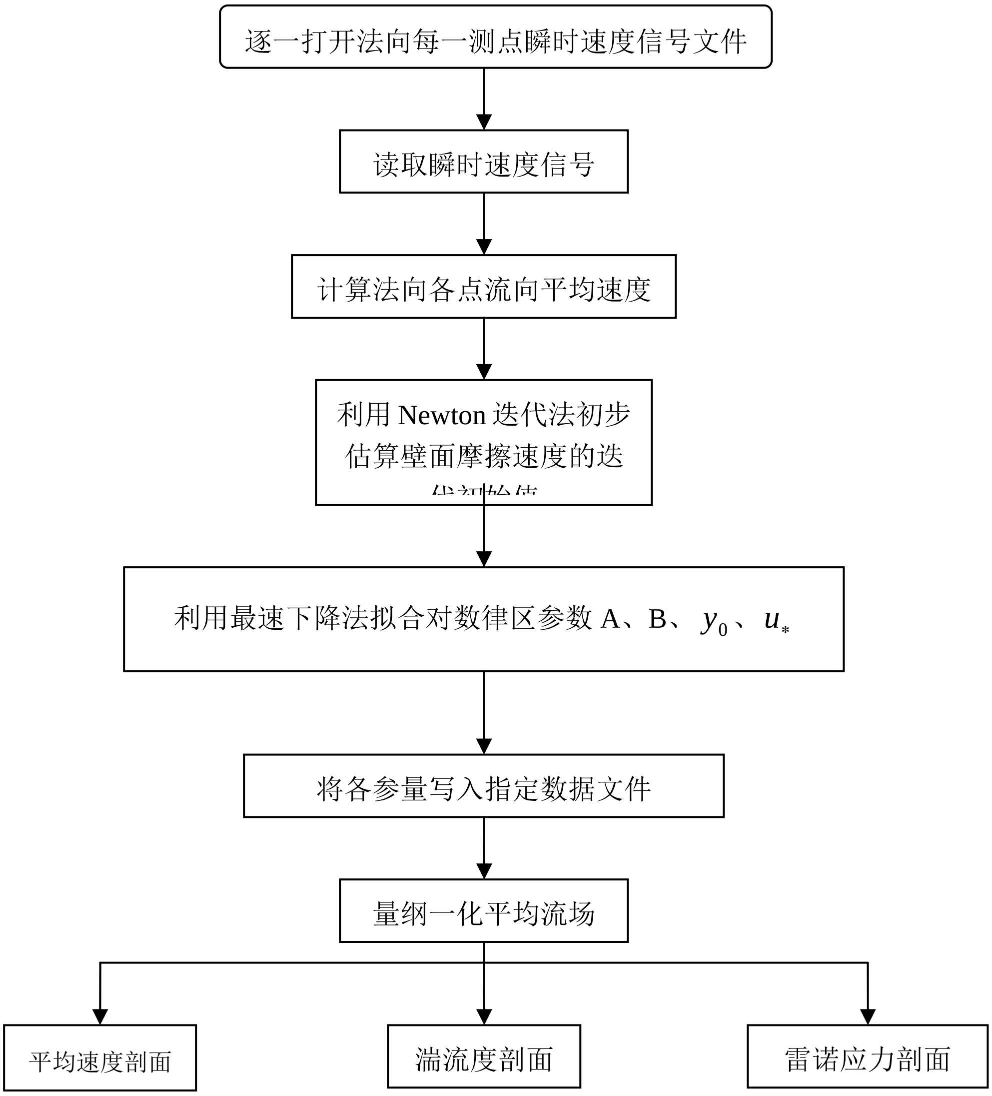


图 1 用平均速度剖面法测量平板湍流边界层壁面摩擦阻力流程图

在距离平板前端 x=1000mm 处，采用 TSI-1243 型双丝热线探针沿法向从距壁面小于 0.7mm 处向上移动，根据实验测量所得的数据绘制无量纲化速度 $u^+ = \mathrm{U}/\mathrm{u}_*$ 和无量纲化法向位置坐标 $y^+ = \mathrm{yu}_*/\nu$ 之间关系的曲线。在实验中采样率取 $f_s = 20kHz$，实验采样时间定为约 13.1072 秒，数据量为 262144。实验的自由来流速度控制在 15m/s 左右，边界层厚度 $\delta = 140$ 毫米，雷诺数 $\mathrm{Re}_\delta = U_\infty \delta / \nu = 129130$。不同流向位置处测得的平均速度剖面，如图 2 所示。从图中可以看到，平均速度剖面经过上面的拟合计算程序以后，和 *Spalding* 曲线符合较好，满足湍流边界层速度的对数律。

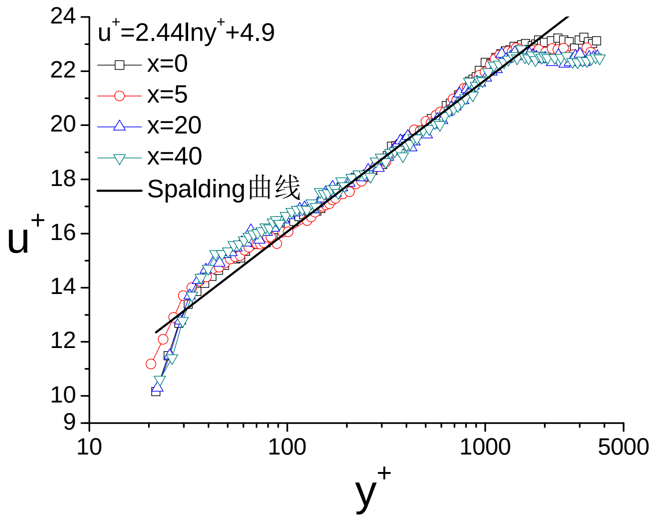


图 2-12-2 平板湍流边界层平均速度剖面图

二、实验目的和要求

1、掌握用平均速度剖面法测量平板湍流边界层的壁面摩擦阻力的原理和基本方法。

2、通过测量湍流边界层近壁区域平均速度并拟合对数律平均速度剖面，测量湍流边界层的壁面摩擦速度u_*，从而测量壁面摩擦阻力τ_w和壁面摩擦系数C_f。

三、实验仪器和设备

1、低速回流风洞或空气动力学多功能实验台；

2、平板模型；

3、IFA300 热线风速仪和已经标定的 TSI1211-T1.5 边界层单丝热线探针（如图 2-1-3 所示）；

4、三维步进电机控制坐标架；

5、计算机及实验数据分析处理软件。

四、问题讨论与思考

1、用不同法向位置的测点平均速度拟合的壁面摩擦速度有何差异？

2、减小湍流边界层的壁面摩擦阻力的关键环节是什么？

3、举例说明减小湍流边界层的壁面摩擦阻力的工程应用前景和意义。

实验 12 氢气泡流动显示实验

一、实验原理

流动是自然界和工程技术中普遍存在的现象，人类研究流动的规律是从观察流动现象开始的，为了记录流动图像，必须提供一套使流动可视化的技术，这种技术称之为流动显示技术。流动显示技术已有一百多年的历史，它是随着流体力学的发展而发展起来的。1883 年雷诺(Reynolds)把染色液注入长的水平管道中的水流中，详细研究了从层流转变为湍流的情况，发现了相似律并定义了雷诺数(R_e 数)。1912 年卡门(Karman)通过观察水槽中圆柱体绕流提出了卡门涡街，1904 年普朗特(Prandtl)用示踪粒子获得了水沿平板的流谱图，观察到靠近壁面有一层薄层流动，其速度比距离薄层较远处的速度显著减小，这一观察使他提出了边界层这一重要概念，并用同样的流动显示技术进行了几种边界层控制的实验。20 世纪 60 年代脱体涡流型的研究，80 年代大迎角分离流的研究和分离流型的提出，以及近代对三维、非定常复杂流动显示与测量的研究等等，这些研究均以流动显示和测量为基础，从观察流动现象开始，在流体力学发展中取得了一次又一次的重大突破。

针对不同的流体，流动显示方法大体上可划分为几大类，第一类是包括在流体中外加示踪粒子的流动显示方法，流体可以是气态或液态，其运用范围大致相应于不可压缩流；第二类是利用所研究的流体介质折射率对流体密度变化很敏感的光学方法，如阴影法、纹影法，其运用范围相应于可压缩流；第三类显示方法称之为外加能量法，加到流体中的是外来能量(例如以加热、放电或化学反应的形式)，其运用范围大致相应于稀薄或低密度气体流动。

流动显示的目的是使流场的流动过程可视化，与其它实验方法的不同之处在于它通过使流场的某些流动特征可视化而获得整个流动参数空间分布的信息。借助它，可以获得有关流动状态的直观图像及流动的时空发展演化过程，有些显示方法还能给出流动参数的定量结果。这对于了解流动现象、建立新的流动概念与物理模型，验证数值计算结果都具有十分重要的意义。同时，流动显示技术本身也是解决实际工程问题的重要手段。

最近几十年，流动显示技术日趋成熟，并且成为研究非定常流动行之有效的方法。借助数字图像处理等定量手段，提取流动图像中包含的定量信息，从而通过定量分析流动显示图像获得同一时刻整个流场流动参数的空间分布。随着电子计算机技术的广泛应用和数字图像处理技术的发展，能够借助计算机来快速准确地处理和分析大量的流动显示图像，提取其中定量信息，直接由计算机统计流场的流动特性，获得定量的结果。

示踪粒子流动显示技术通过向流体中加入一定量微小尺度（直径几十微米量级到几十纳米量级）的示踪粒子，利用可见的粒子跟随流体运动的轨迹来显示流动结构和流动现象，针对记录的流动图像，借助计算机和数字图像处理技术，可以通过测量粒子在流体中的运动速度定量测量流速的空间分布。水经过电解可产生氢气泡和氧气泡。相比较，氢气泡直径小，而且数量大，适宜用作示踪粒子显示流动。实验时，在流动的水中放置一支架，焊上细金属丝（如白金丝、钨丝、不锈钢丝和铜丝），接到电源的负极上，下游放置一铜板或碳棒，接

到电源正极上，打开电源开关，在细金属丝（称阴极丝）上立即产生出大量细小、白色的氢气泡随水流动，从而将流动图像显示出来。

实验证明，氢气泡的直径与阴极丝的直径同量级。当流速在（1～25）cm/s 范围内，丝的直径用（10～50）μm 是合适的，可以忽略气泡上浮的影响。流速较低时，应选细一些的丝，流速较高时，可用较粗的丝。

显示效果，与氢气泡的生成量密切相关。根据法拉弟电解定律可知，在一个大气压下，电解 T ^{0}K 的水，在单位时间内产生的氢气体积为：

$$Q=0.396\,IT$$

式中　Q—氢气单位时间内生成的体积，cm^3/s

I—电解电流强度，mA

T—水的温度，^{0}K

由此可知，控制氢气泡生成量的方法是：(1) 改变水的温度；(2) 改变电解电流，通常是靠调节电源电压、改变水的电阻率及调整极间距离来实现。

采用时间线——脉线组合技术、氢气泡示踪法可定量测出流场的速度。比较简单的办法是在流场中，垂直流向放置一根直阴极丝，将其分段涂上绝缘层（例如刷上清漆），加以脉冲电压，这样产生的泡列既能表示粒子的位移，又有时间的信息，就可以实现定量测量。

以定常的均匀流场为例，如图 2－2 所示：



脉冲电压　　　　泡列

图 2－2 脉冲氢气泡阵列示意图

测出电压脉冲的频率，在照片上测出两个泡列之间的距离，速度即可求出：

$$u=\Delta x\cdot f\cdot K$$

式中　u—流场速度，cm/s

Δx—两个泡列之间的距离，cm

f—电脉冲频率，1/s

K—把照片上的距离变成实际位移的比例因子。

为了对氢气泡显示的流动图像进行分析、处理，一般采用摄影的方法来记录图像。先布置好照明灯光，再对电源的电压幅值，频率、脉宽进行综合调节，待得到最佳显示效果后，即可用 CCD 或数码摄像机采集流动图像，作为实验资料。

氢气泡流动显示法作为流动显示示踪粒子已有很长的历史，它的主要优点是：操作简便、成本低、对实验设备无污染且流态显示清晰，是水洞力学实验中进行定性流动显示常用的一种方法。不仅可以获得流动图像，还可以定性或定量分析流动结构和流动参数的时空演化过程。Schraub 等[1]提出了根据脉冲的氢气泡时间线测量流速空间分布的时间一染色线技术；Kline 等从氢气泡时间线得到湍流边界层瞬时流速的展向分布。在 60 年代，图像数字化处理技术尚不成熟，人工处理流动图像的工作量很大。90 年代，Lu 和 Smith 利用流动图像

数字化处理技术，从氢气泡时间线获得湍流边界层瞬时速度的法向分布，再通过 VITA 条件采样，求得猝发频率和发生猝发时的瞬时速度。此方法的优点是可以得到猝发产生前后的速度型和有关的流动结构的变化。

二、实验仪器和设备

1　流动显示水槽

本实验是在 SZ－2 型开口式循环水槽中进行的。该水槽由循环式槽体，槽体支架，储水箱，供水泵等部分组成，如图 2 所示。槽体由有机玻璃制成，全长 200cm，高 50cm，可分为实验段，拐角段，扩散段，收缩段等部分。实验段长度为 130cm，宽 14cm，深 15cm，其流速在 0－0.4m/s 范围内连续可调，以可控硅电磁调速器闭环控制的滑差电机实现。该电机带动叶轮推动水的流动。收缩段的收缩比为 1：3.24，扩散段的扩散角为 3.5°。在拐角段内部装有拐角导流片，收缩段前有蜂窝器；在拐角段顶部装有排气孔，底部装有排水阀门。

2　氢气泡流动显示装置

流动显示的设备布置如图3。应用氢气泡流动显示技术显示平板湍流边界层近壁区域的相干结构猝发现象，流动显示装置包括脉冲电源、阴极丝支架、片光源及坐标架。阴极丝用的是直径10 μm 的钨丝。阴极丝平行于壁面、垂直于主流方向。阴极丝支架由钢丝焊成，表面涂有绝缘漆，兼做电源导线。为了便于精确调节阴极丝距离壁面的法向位置，支架安装在一台三自由度坐标架上。图像的记录是用高清摄像机，摄像机被安放在垂直壁面的方向上。

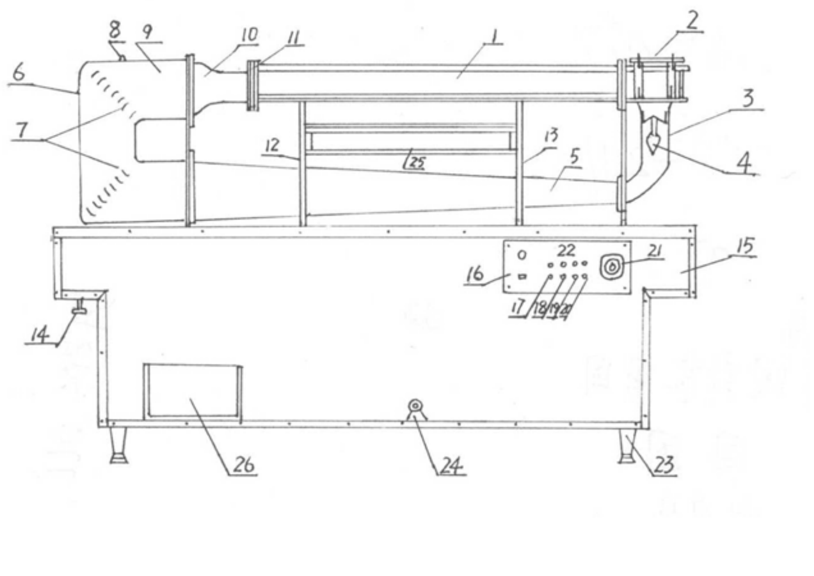


图2　流动显示水槽结构图

1-实验段，2-轴流泵电机，3-单弯段， 4-轴流泵叶轮，5-扩散段，6-双弯段，
7-拐角导流片，8-排气孔，9-蜂窝器，10-收缩段，11-阻尼网，12-槽体前支架，
13-槽体后支架，14-槽体台架，15-排水阀，16-总电源开关，17-轴流泵开关，
18-供水泵开关，19-日光灯开关，20-光源开关，21-调速旋钮，22-指示灯，
23-可调支脚，24-供水泵，25-日光灯组，26-贮水箱

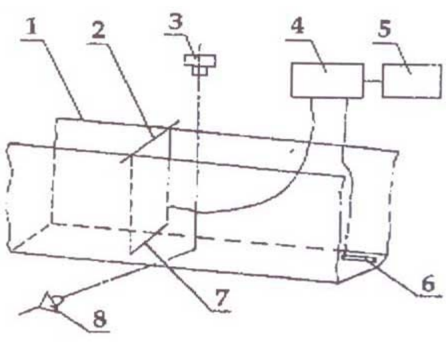


图 3　氢气泡流动显示装置图

1 水槽.2 阴极支架.3 摄象机.4 直流脉冲电源.5 频率计.6 铜棒.7 阴极丝. 8 激光片光源

3　直流脉冲电源

用直流脉冲电源在阴极丝上加上脉冲电压，从而在产生氢气泡时间线。脉冲电源的输出电压、频率和脉宽是可调的。由于本文采用“帧间比较”定量分析方法。所以不需要精确地测量脉冲频率，只需针对流动情况调节合适的频率、脉宽及电压。直流脉冲发生器发生器如图4所示，实验采用直流脉冲，周期为48.8ms，脉宽为5.2ms，电压为120V。



图4 直流脉冲电源发生器

4 激光片光源

实验所采用的激光片光源如图 5 所示，型号 GL532T-100L，功率 500mW，波长为 532nm，距 70 厘米片光源宽度为 1.6mm。坐标价如图 5-2-5 所示为 STONE 56BYG250C，步距角 $0.6^0/1.8^0$，精度为 0.1mm。

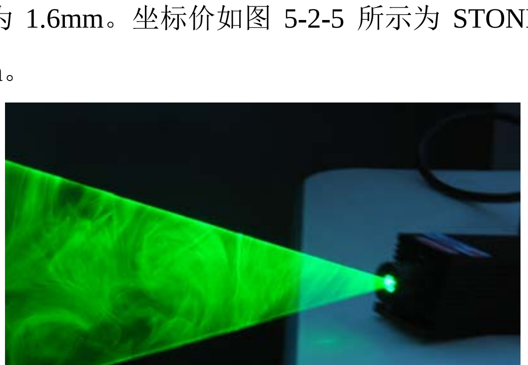


图 5 激光片光源

5　**图像采集系统**

实验的图像采集系统的为一台 Sony 公司制造的 Hc3E 高清摄像机（如图 6 所示），成像设备为 5.9mm（1/3 型）CMOS 传感器，可记录的像素静像时最大为 4 百万像素（2304×1728）（4：3），总计约 2103000 像素，有效像素（动画，4:3）1076000。使用 DVM60 盒式录像带，录像带速度约为 18.81mm/s，快进/倒带时间约为 2 分 40 秒。



图 6　索尼公司 HDR-HC3E 高清晰度摄录一体机

三、实验目的和要求

1、了解氢气泡示踪法的原理；
2、掌握氢气泡显示流动的基本技术；
3、学会用氢气泡示踪法测量均匀流场的速度。

四、实验操作步骤

1、选择粗细合适的阴极丝焊接到阴极支架上。
2、向水槽放水。若自来水中杂质多，将影响显示效果，可改用纯净水（如蒸馏水或无离子水），添加氯化钠等电解物质。
3、在流场中布置好阴极丝、阳极和绕流物体，连接好有关导线。
4、启动水泵，调节流速旋钮至合适的流速，使氢气泡线的距离适当。
5、打开直流脉冲电源和频率计的电源开关，布置好照明灯光，综合调节获得最佳显示效果后采集流动图像，同时记录脉冲电压的频率。
6、关闭水源和电源，整理实验仪器，编写实验报告。

五、问题讨论与思考

1、简述氢气泡流动显示的原理？
2、如何获得最佳的氢气泡流动显示图像？
3、根据氢气泡流动显示图像如何实现流速定量测量？
4、评述氢气泡示踪法的优缺点及发展前景？

实验 13 水槽中湍流边界层瞬态流动结构的 TRPIV 测量

一．实验目的和要求

1.了解 TR-PIV 的实验原理。

2.掌握水槽流场的 TR-PIV 测量及流场参数分析方法。

二．实验仪器

1、SZ-2 型开口式循环水槽

2、PIV 测量系统（片光源系统、图像拍摄系统、数字图像处理系统、示踪粒子）

三．实验原理

PIV 是一种粒子图像测速技术，粒子图像测度技术是近几十年发展起来的一种崭新的流速测量技术，它在流动显示的基础上，由 70 年代末兴起的激光散斑全场测速技术（Laser Speckle Velocimetry，简称 LSV）演变而来，它融合了计算机图像处理与光学技术于一体，主要特点是突破了空间单点测量技术的局限性，可在同一时刻记录下整个测量平面的相关信息，从而可以获得流动的瞬时平面速度场、涡量场等。与热线风速仪(HWA)相比，PIV 是一种非接触式瞬态流场多点激光测速系统。其测量对流场无干扰，测量精度和空间分辨率亦可与 PDA 和 HWA 媲美。与逐点测量的 PDA 和 LDV 相比，PIV 属于面测量，一方面大大提高了测试效率，另一方面可有效获取非定常瞬态流动图像。目前，PIV 测试技术已得到广泛的应用。

TR-PIV（Time-Resolved Particle Image Velocimetry），时间分辨的粒子成像速度仪，是几年来发展起来的流场激光测量技术，它采用高速 CCD 相机和高频脉冲激光器，保证了采集图像的时间间隔为微秒量级，可以快速的拍摄和存储流场的图像，使得捕捉的流场速度范围大大提高，并且具有更高的工作频率，可以有效的测试流场中的非定常特征，有效的捕捉到流场结构的动态特性。连续式激光器发出的的高频脉冲激光由棱镜转变为片光源，在同步器的作用下，由高速相机同步连续捕捉一次两帧图像，得到的数据在 DynamicStudio 软件内进行互相关算法处理，得到瞬态的流场结果，再进一步处理成为时均的流场、涡量场等。

PIV 原理

PIV 系统的工作原理是在流场中添加合适的示踪粒子，用脉冲激光片光源照射所测流场区域，通过成像记录系统摄取两次曝光的粒子图像，形成 PIV 底片，再用图像处理技术处理 PIV 底片，获得示踪粒子图像的平均位移，由此确定测量区域内的速度场,具体示意图

如图 2-11 所示。PIV 的工作原理还可以用速度的定义式：

$$u = \lim_{\Delta t} \frac{x_2 - x_1}{\Delta t}; v = \lim_{\Delta t} \frac{y_2 - y_1}{\Delta t}$$

其中 Δt 为两次曝光的时间间隔；x_1, x_2, y_1, y_2 是 Δt 时刻前后粒子坐标位置，u, v 是粒子速度分量。

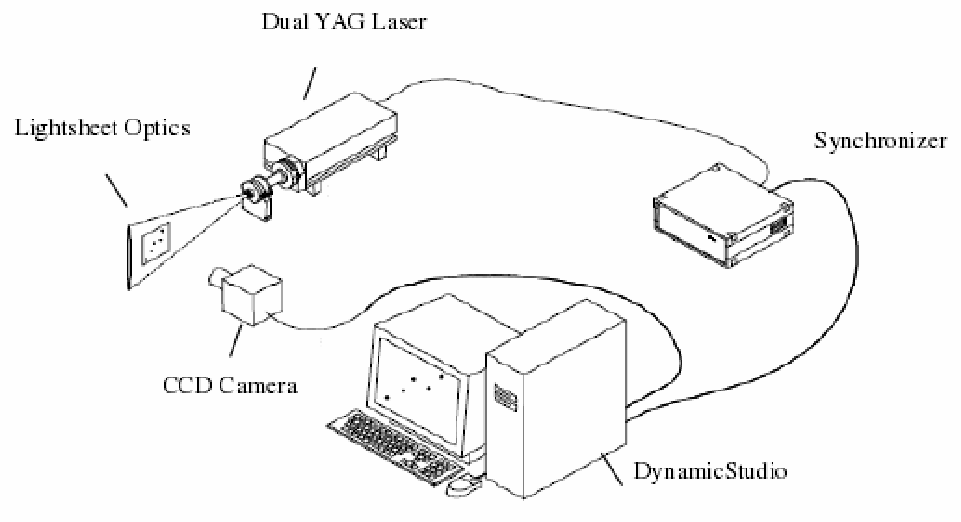


图 2-11 PIV 实验原理

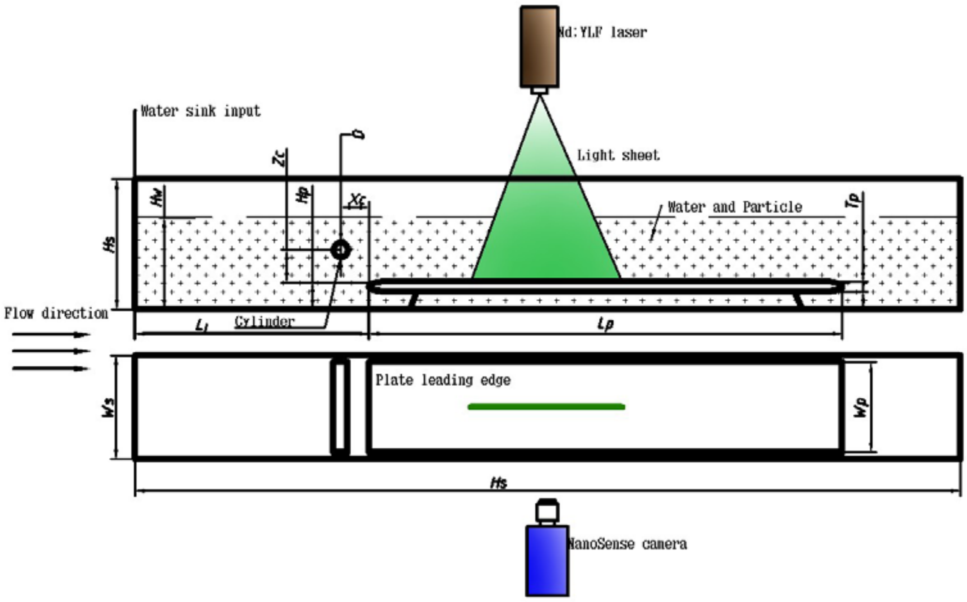
PIV 系统最重要的部分包括片光源系统、图像拍摄系统、数值图像处理系统、示踪粒子。片光源系统的作用是照亮测量区域，使测量区域内的示踪粒子产生散射光，并保证散射光的强度足以使 PIV 图像拍摄系统记录下示踪粒子的位置。

图像拍摄系统的作用是感应示踪粒子产生的散射光，一般采用数字 CCD 相机，它能够记录示踪粒子图谱的瞬态数字信号。CCD 相机的图像拍摄方法分成两类：一类是自相关模式（Auto-Correlation），另外一类是互相关模式（Cross-Correlation)。

为获得示踪粒子在两次曝光间隔内的位移，需要对 CCD 相机获取的两次曝光时可的示踪粒子图像进行相关处理，目前较常使用的处理技术是快速傅立叶变换。在 PIV 图像处理技术中，一般将 CCD 相片划分成许多方形小区域，即查询区（Interrogation area），图像的相关处理实际上是在每一块查询区进行的，得出每一块查询区内所有示踪粒子的平均速度，作为该查询区的速度。所有查询区的速度组成了整个流动区域上的速度场。

PIV 测量的最后一个重要环节是示踪粒子。作为 PIV 测量的示踪粒子需要满足以下两个基本要求：良好的光散射体，即可见度高，产生足够亮度的散射光；跟随性强，即粒子和流体流动之间的相对运动尽可能小。但是这两个要求有时矛盾，通常示踪粒子的可见度随它的尺寸的增加而增加，而尺寸愈大的示踪粒子对流动的跟随性愈差，因此，在考虑这两个要求时，失踪粒子的粒径大小是一个关键问题，需要根据测量的具体实验条件酌情处理。

四．实验装置



五．实验步骤

1、安装好激光器、相机位置，做好各项准备工作。

2、开启水槽，建议将流速调至 0.2m/s 左右开始实验。

3、向水中撒入示踪粒子，对所测流场进行标定，开始拍摄流动图像。

4、关闭激光器，停止水泵运转，整理好仪器设备。

5、处理流动图像，计算所测流场瞬时速度、平均速度、涡量等各项参数。

6、编写实验报告。

六．思考题

1.PIV 测量原理是什么？

2.与热线风速仪与 LDA 相比，PIV 有何优势及不足？

3.如何根据所拍图像来分析整个流场？

实验 14 圆柱与非圆截面柱体尾涡结构的流动显示

一、实验目的

1、了解卡门涡发射原理；

2、学会旋涡发射频率的测量；

二、仪器设备

1、中型水槽

2、卡门涡街发生器（圆柱、三棱柱）

三、实验装置

四、基本原理

粘性流体绕曲面固壁流动时，靠近物体表面的边界层的逆压梯度区域内，某个位置会使流体动能耗尽，导致边界层脱离开物体表面，即产生边界层分离，伴随着有旋涡产生。

若在一均匀流场中放置一圆柱体，当雷诺数 Re＞40 以后，将会从圆柱体两侧不断地、交替地发射旋涡，称为卡门涡街。卡门证明，对圆柱体后的卡门涡街，当雷诺数大于 150 后，两列旋涡之间的距离 h 对同列中相邻两旋涡的间距 L 之比为 0.281，涡列达到稳定状态。旋涡的脱离频率 f 与来流速度 U 及圆柱直径 d 满足下列关系：$f = S_t \frac{U}{d}$。式中 S_t 称为斯特罗哈数（V.Strouhal），与 Re 数有关。在 Re＝10^3～1.5×10^5 范围内，S_t 数为常数（约等于 0.21），此时，f 与 U 存在一一对应的关系。如果测出 f，就可以求得 U，从而可得流量 Q。利用这个原理，可制成卡门涡街流量计，其流量公式为：Q＝K f。式中 K 称为流量系数，与仪表和被测管道的几何尺寸有关。

五、实验步骤

1、做好各项准备工作。

2、开启水槽，建议将流速调至 0.2m/s 左右开始试验。

3、向水中注入染色液，开始拍摄流动图像。

4、停止水泵运转，整理好仪器设备。

5、处理流动图像，计算卡门涡街的空间波长、发射频率。

6、编写实验报告。

六、思考题

1、卡门涡街是怎样产生的？

2、怎样通过测量频率来测量流速、流量？

3、分析影响旋涡发射频率测定的因素。

实验 15 用热线风速仪测量圆柱尾流平均速度分布

一、实验原理

在流体力学的学习中，我们知道理想流体绕圆柱体流动时既无升力，又无阻力；而粘性流体绕圆柱流动时不可避免地要在物面上产生摩擦阻力，同时由于边界层的分离，前后柱面上压强分布的不对称，因而形成压差阻力，结果引起气流对圆柱体的作用力（阻力）。对于像圆柱一类的非流线型体，如果能够测出圆柱后面某过流断面的速度分布，即可根据动量定理确定气流对圆柱的作用力。圆柱尾流湍流场中的速度分布的测量对于我们认识圆柱绕流的特点具有重要意义。

圆柱的前方来流是均匀的，由于边界层的分离，在圆柱后形成尾迹，尾迹中的流体速度不能恢复到 U，形成速度亏损。本实验用 IFA-300 恒温热线风速仪精细测量圆柱后某截面上的平均速度分布，确定圆柱尾流场中的速度变化规律。

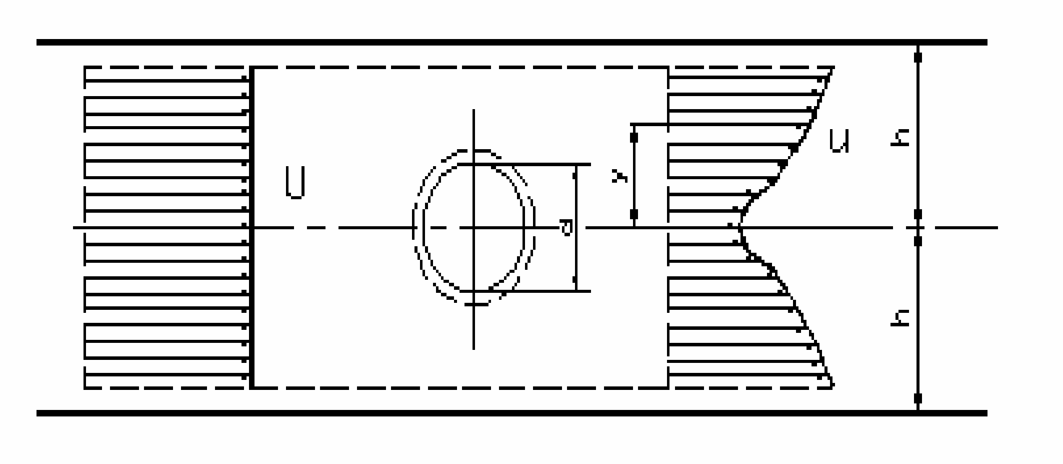


图 1 圆柱尾流场中的平均速度变化规律

二、实验目的和要求

1、熟练使用 IFA300 热线风速仪；

2、测量圆柱后过流截面上的平均速度分布；

3、了解圆柱尾流的平均速度剖面沿流向的演化规律。

三、实验仪器和设备

1、低速回流风洞；

2、圆柱模型；

3、IFA300 热线风速仪和已经标定的热线探针；

4、毕托管；

5、微差压计；

6、三维步进电机控制坐标架；

7、计算机及实验数据分析处理软件。

四、实验装置

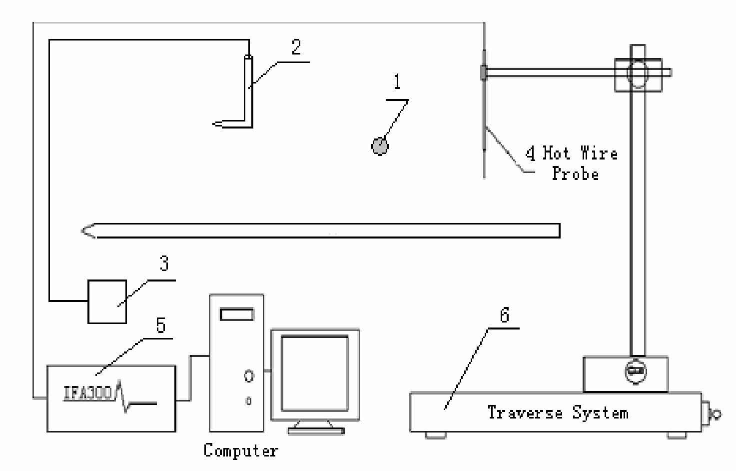


图 2 实验装置图

1. 圆柱体　　2. 毕托管　　3. 微差压计　　4. 双丝热线探针

5. IFA300 热线风速仪　6. 三维控制坐标架

五、实验操作步骤

1、将装有圆柱体的实验段放在收缩段上，将毕托管接到微差压计上。

2、将热线探针支杆插入保护套内，将标定好的热线探针固定在探针支杆上，将热线探针支杆固定在三维坐标架上。

3、将热线探针专用电缆一端与热线探针支杆连接，另一端与热线风速仪连接，用通讯电缆将热线风速仪与计算机 com1 通讯口连接，热线风速仪输出电缆与计算机数据采集卡（A/D 卡）连接，用通讯电缆将三维步进电机坐标架控制器与计算机 com2 通讯口连接。

4、检查风洞电源开关，热线风速仪电源开关，步进电机坐标架控制器电源开关，计算机电源开关均处于断开位置。

5、接通风洞电源，热线风速仪电源电源，步进电机坐标架控制器电源，计算机电源。

6、调整坐标架，使探针到达第一个测量点位置，调节风洞至所需要的风速。

7、启动热线风速仪测速软件，调入测量点空间位置坐标文件，调入热线探针文件，调入三维步进电机坐标架驱动程序，逐点开始测量。

8、结束实验，关闭热线风速仪测速软件，将风洞调至最低风速，关闭风洞电源，热线风速仪电源电源，步进电机坐标架控制器电源。卸下热线探针放入探针盒中，将热线探针支杆插入保护套内，整理仪器设备。

9、处理实验数据，利用热线探针校准文件将瞬时电压信号文件转换成二进制速度文件。

10、编写程序，求出各点平均速度，画出圆柱尾流区的速度分布图。编写实验报告。

六、问题讨论与思考

1、控制圆柱尾流中流动结构有何意义？

2、举例说明控制圆柱尾流中流动结构的工程应用实例。

实验 16 用热线风速仪测量圆柱尾流湍流度和雷诺应力分布

一、实验原理

二、实验目的和要求

1、熟练使用 IFA300 热线风速仪；
2、测量圆柱后过流截面上的湍流度和雷诺应力分布规律；

三、实验仪器和设备

1、低速回流风洞或空气动力学多功能实验台；
2、圆柱模型；
3、IFA300 热线风速仪和已经标定的热线探针；
4、毕托管；
5、微差压计；
6、三维步进电机控制坐标架；
7、计算机及实验数据分析处理软件。

四、实验装置

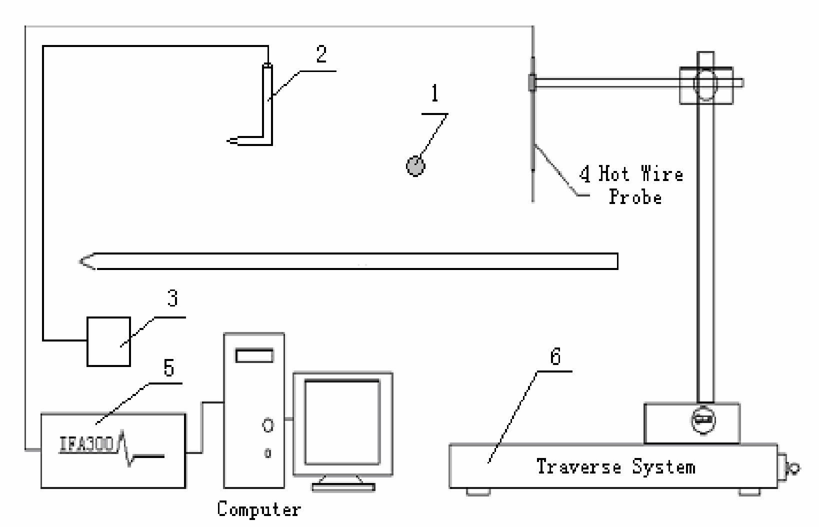


图 2 实验装置图

1. 圆柱体　2. 毕托管　3. 微差压计　4. 双丝热线探针
5. IFA300 热线风速仪　6. 三维控制坐标架

五、实验操作步骤

1、将装有圆柱体的实验段放在收缩段上，将毕托管接到微差压计上。
2、将热线探针支杆插入保护套内，将标定好的热线探针固定在探针支杆上，将热线探针支杆固定在三维坐标架上。
3、将热线探针专用电缆一端与热线探针支杆连接，另一端与热线风速仪连接，用通讯电缆将热线风速仪与计算机 com1 通讯口连接，热线风速仪输出电缆与计算机数据采集卡（A/D 卡）连接，用通讯电缆将三维步进电机坐标架控制器与计算机 com2 通讯口连接。
4、检查风洞电源开关，热线风速仪电源开关，步进电机坐标架控制器电源开关，计算机电

源开关均处于断开位置。
5、接通风洞电源，热线风速仪电源电源，步进电机坐标架控制器电源，计算机电源。
6、调整坐标架，使探针到达第一个测量点位置，调节风洞至所需要的风速。
7、启动热线风速仪测速软件，调入测量点空间位置坐标文件，调入热线探针文件，调入三维步进电机坐标架驱动程序，逐点开始测量。
8、结束实验，关闭热线风速仪测速软件，将风洞调至最低风速，关闭风洞电源，热线风速仪电源电源，步进电机坐标架控制器电源。卸下热线探针放入探针盒中，将热线探针支杆插入保护套内，整理仪器设备。
9、处理实验数据，利用热线探针校准文件将瞬时电压信号文件转换成二进制速度文件。
10、编写程序，求出各点平均速度，画出圆柱尾流区的速度分布图。编写实验报告。

六、问题讨论与思考

1、分析圆柱尾流平均速度剖面与湍流度和雷诺应力剖面的关系。

2、为什么圆柱尾流的湍流度和雷诺应力最大位置在圆柱尾流边界处？

3、增强或削弱圆柱尾流中的湍流度有何实际意义？

2、举例说明控制圆柱尾流湍流度的工程应用实例。

实验 17 水槽中圆柱尾流的 TRPIV 测量

一、实验目的

1、了解 TR PIV 测量原理；

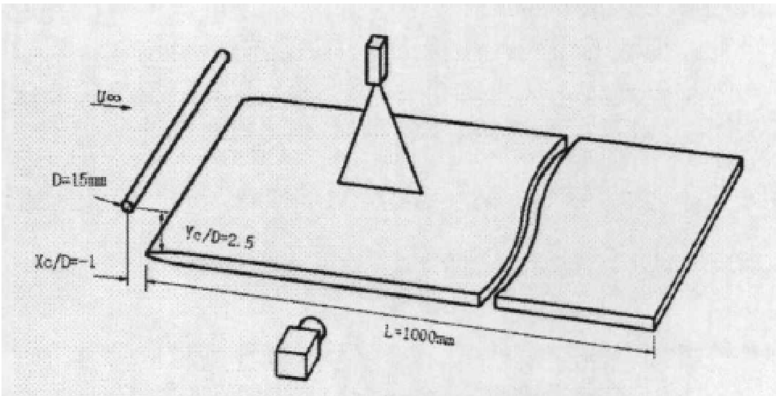
2、掌握卡门涡发射原理及各项参数的测量；

二、仪器设备

1、SZ-2 型开口式循环水槽

2、PIV 测量系统（片光源系统、图像拍摄系统、数值图像处理系统、示踪粒子）

三、实验装置



四、基本原理

流体经过钝头体后,在尾流中会形成强烈的非定常旋涡,并由此产生破坏性的非定常气动力.如何避免这种非定常气动力,是工业空气动力学研究的重要课题之一。实践中,通常采用破坏流动二元性,来避免尾流中涡街的产生。钝头体近尾流是极为复杂的流动,特别是在高雷诺数情况下,无论理论分析、数值计算或试验测量,都遇到很大的困难,因而仍有许多遗留问题有待研究解决.例如涡街形成的机理、尾流中涡量减少的原因等。充分理解近尾流的流动结构,是利用和控制非定常旋涡产生的气动力的前提。

若在一均匀流场中放置一圆柱体，当雷诺数 Re＞40 以后，将会从圆柱体两侧不断地、交替地发射旋涡，称为卡门涡街。卡门证明，对圆柱体后的卡门涡街，当雷诺数大于 150 后，两列旋涡之间的距离 h 对同列中相邻两旋涡的间距 L 之比为 0.281，涡列达到稳定状态。旋涡的脱离频率 f 与来流速度 U 及圆柱直径 d 满足下列关系：$f = S_t \frac{U}{d}$。式中 S_t 称为斯特罗哈数（V.Strouhal），与 Re 数有关。在 Re＝10^3～1.5×10^5 范围内，S_t 数为常数（约等于 0.21），此时，f 与 U 存在一一对应的关系。如果测出 f，就可以求得 U，从而可得流量 Q。利用这个原理，可制成卡门涡街流量计，其流量公式为：Q＝K f。式中 K 称为流量系数，与仪表和被测管道的几何尺寸有关。

PIV 的主要特点是突破了空间单点测量技术的局限性，可在同一时刻记录下整个测量平面的相关信息，从而可以获得流动的瞬时平面速度场、涡量场等。在流场中添加合适的示踪

粒子，用脉冲激光片光源照射所测流场区域，通过成像记录系统摄取两次曝光的粒子图像，形成 PIV 底片，再用图像处理技术处理 PIV 底片，获得示踪粒子图像的平均位移，由此确定测量区域内的速度场。与热线风速仪(HWA)相比，PIV 是一种非接触式瞬态流场多点激光测速系统。

五、实验步骤

1、安装好激光器、相机，做好各项准备工作。
2、开启水槽，建议将流速调至 0.2m/s 左右开始试验。
3、向水中撒入示踪粒子，对流场进行标定，开始拍摄流动图像。
4、关闭激光器，停止水泵运转，整理好仪器设备。
5、处理流动图像，计算整个流场的瞬时速度、平均速度及涡量等参数。
6、编写实验报告。

六、思考题

1、卡门涡街是怎样产生的？
2、漩涡脱落在工程上有何危害？
3、如何对尾流进行控制，这在工程上有何意义？

实验 18　弯道压力分布实验

一、实验原理

流体流经弯道时，气流方向偏转，产生离心力，沿弯道径向压力逐渐增大，加之管壁上存在边界层，会在横断面内形成二次流，（二次流是指叠加在主流上并与主流方向垂直的附加流动，它使流场的速度分布和壁面切应力复杂化，流动掺混性加剧及流动阻力增加。）二次流与主流叠加，实际的流线是螺旋线，流动情况相当复杂。本实验是将势流解与实测结果作出比较。

当忽略二次流仅按势流分析时，设来流速度为u，弯道径向的速度分布规律为：$u=\frac{C}{r}$

式中 u 为曲率半径 r 处的流速，C 是常数。

而流量 Q=$U_{\infty}b(r_2-r_1)=b\int_{r_1}^{r_2}Udr$，式中$b$为弯道过流断面的宽度。

将$u=\frac{C}{r}$代入上式，得：$U_{\infty}(r_2-r_1)=\int_{r_1}^{r_2}\frac{C}{r}dr$

积分可得：C=$U_{\infty}\frac{r_2-r_1}{\ln(r_2-r_1)}$，而 C=$ur$，因而，沿径向无量纲速度分布为：

$$\frac{u}{U_{\infty}}=\frac{r_2-r_1}{r\ln(r_2-r_1)}$$

给出曲率半径 r，即可计算无量纲速度$\frac{u}{U_{\infty}}$。

由于稳压箱体积甚大，可认为其中压力为总压P_0。运用伯努利方程（$\frac{v^2}{2}+\frac{p}{\rho}=C(\psi)$）于稳压箱及收缩段出口两截面，有 0+$P_0=\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2+P_{\infty}$

则得来流的动压为：$P_0-P_{\infty}=\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2$

弯道内任意一点的压力系数为：$\overline{P}=\frac{P-P_{\infty}}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2}$

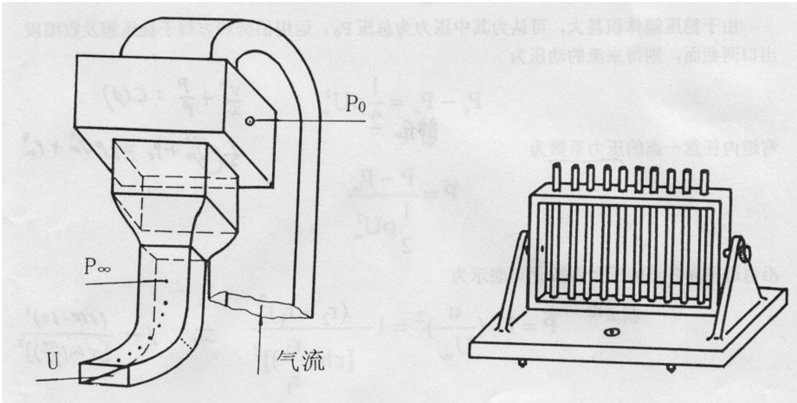
沿弯道径向各点的压力系数为：$\overline{P}=1-(\frac{u}{U_{\infty}})^2=1-\frac{(r_2-r_1)^2}{[r\ln(\frac{r_2}{r_1})]^2}$

二、实验目的

1、学习用多管压力计测定管道中流动的压力分布；
2、通过实验加深对弯道内流动规律的理解。

三、实验设备

1、空气动力学多功能实验装置 DQS-1 型
2、多管压力计



四、实验步骤

1、将多管压力计调平，使各测压管中液面读数基本相同，根据实验要求，调整压力计的液面高度及倾斜角。
2、将稳压箱，参考孔以及管壁上的测压孔用胶管与多管压力计的测压管连接。
3、记录各测压管的初读数。
4、开启风机，选取闸门适当开度。记录各测压管终读数。
5、先后测出内侧、外侧、径向的压力分布。
6、关闭风机。
7、编写实验报告。

五、实验数据及结果

弯道的几何参数：r_1=60mm，r_2=110mm，b=120mm

将实验数据计入表内（表格如下），计算各点的压力系数$\overline{P}$及径向无量纲速度$\frac{u}{U_\infty}$，并绘制曲线。

六、问题思考与讨论

1、流体流经弯道时，沿流动方向管道内外侧静压变化如何？
2、在弯道径向静压变化如何？
3、流体流经弯道时流动状态如何？为什么会产生压力损失？

内侧壁面

测压孔编号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测压管读数	初读数										
	末读数										
	读数差										
压力系数 $\overline{P}$											

外侧壁面

测压孔编号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测压管读数	初读数										
	末读数										
	读数差										
压力系数 $\overline{P}$											

径向壁面

测压孔编号		1	2	3	4	5	6	7	8	9
测压管读数	初读数									
	末读数									
	读数差									
压力系数 $\overline{P}$										

径向压力系数计算值与实测值比较

测压孔编号		1	2	3	4	5	6	7	8	9
曲线半径 r（mm）		65	70	75	80	85	90	95	100	105
无量纲速度 U/V_∞										
压力系数 $\overline{P}$	计算值									
	实测值									

实验 19　半圆形防波堤分离涡的流动显示与表面压力分布的测量

一、工程背景介绍

半圆型防波堤（如图 4-3-1-1 所示）是一种新型的防波堤结构。其主要功能是为港口提供掩护条件，阻止波浪和漂沙进入港内，保持港内水面的平稳和所需要的水深，同时，兼有防沙、防冰的作用。半圆型防波堤于上世纪九十年代首先由日本研发的一种新型结构，其半圆堤身是由钢筋混凝土预制，安放在抛石基床上。该结构形式具有省料、省工和稳定性好等优点。应用前景十分广阔，该结构形式在天津港南疆东横堤首次使用，并在长江口深水航道整治工程中得到广泛应用。

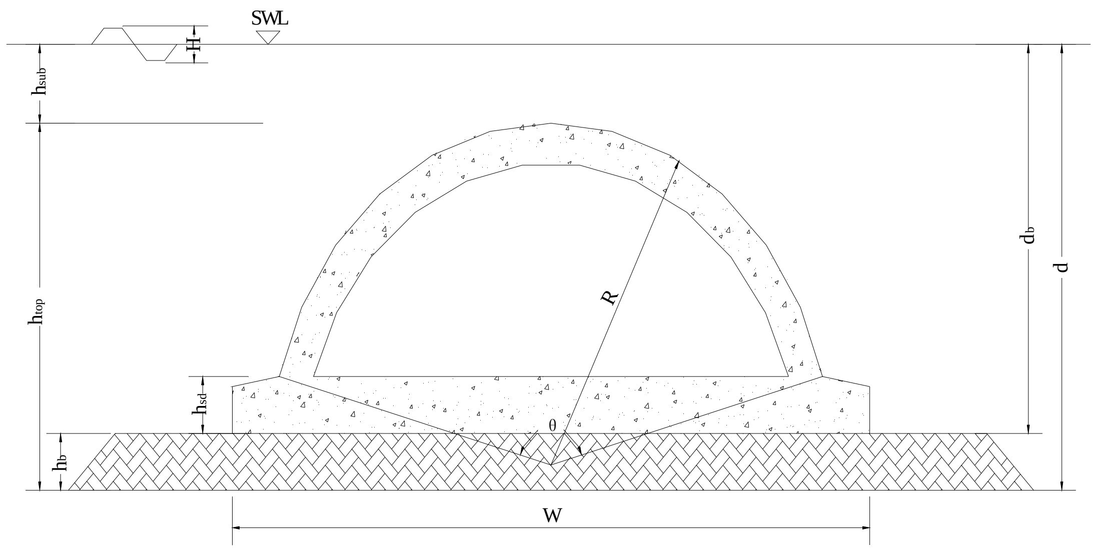


图 4-3-1-1 半圆型防波堤断面结构图

断面的几何参数

半径 R（米）	夹角θ（度）	肩高 h_{sd}（米）	底板宽（米）	基床高（米）
3.7	180.00	1.70	7.4	0.6

在实际工程应用中，半圆型防波堤需要经受多种不同流动条件（不同堤前、堤后水位高度、不同来流速度和方向、不同频率和振幅的波浪）的考验。特别是需要研究不同工况下防波堤的压力分布和位移、应力、应变等物理量的动力学响应。因此，开展不同流动条件对半圆型防波堤影响的实验研究对于半圆型防波堤的工程安全和工程应用具有重要的意义。

二、实验技术与研究方法

实验是在天津大学流体力学水槽实验室中进行，水槽长、宽、高分别为 6m\0.25m\0.4m。半圆型防波堤模型的截面半径是 100mm，宽 250mm，堤身安装在 240mm\250mm\38mm 的底板上，其中半圆形构件不开孔，底板开孔以便于导出测压管。在中间位置沿半圆周向间隔 10 度开小孔（直径 1mm），布置了 17 个压力测量点（如图 4-3-1-2 所示），与倒置的多管测压计相接以便测压。

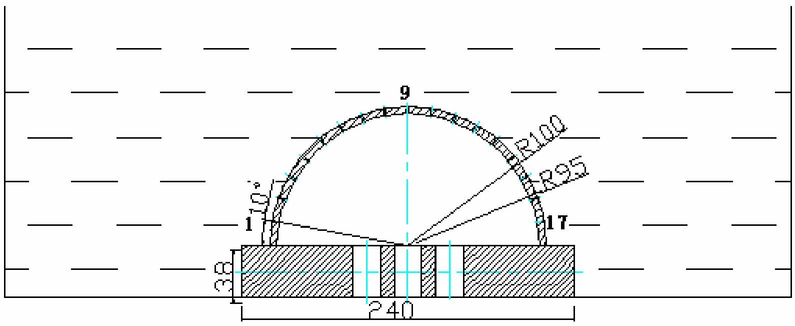
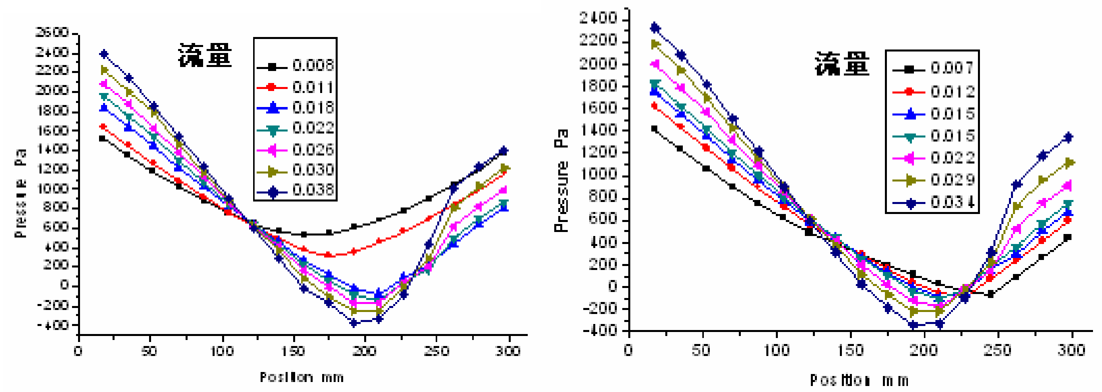


图 4-3-1-2 半圆型防波堤测压孔分布图

三、实验目的和要求

将流体通过半圆型防波堤的流动状况分为两大类：堤后浅水位流动和堤后深水位流动（即在流动过程中，若堤后水位低于半圆型防波堤的一半高度称为堤后浅水位流动，反之就是堤后深水位流动状况）。当半圆型防波堤在静水中处于半淹没乃至全裸露状态时，则波浪来袭时，对应的流动状况就是第一类流动，而当防波堤在静水中处于半淹没直至全淹没状态时，波浪的越堤过程则对应第二类流动。其次，就是在这两类不同的流动状态下，半圆形构件外表面的流动、边界层分离状况及其随流量的变化趋势明显不同，从而半圆形构件的受力状况也是不同的。

实验要求分别测量两类流动状况在不同流量 Q 时半圆形防波堤表面的压力分布（如图 4-3-1-3 所示），从压力分布图中分析顺压区、逆压区以及边界层分离点的位置在两类流动中随流量 Q 的变化规律并分析其原因。



A 浅水位流动　　　　**B** 深水位流动

图 4-3-1-3 半圆型防波堤表面压力分布图

通过实验测得不同流量下半圆型防波堤表面压力分布，以半圆弧面的前端点作为零点，到半圆上任一点的弧长记为 l ,即可拟合出外表面压力 P 随弧长 l 的函数关系式：

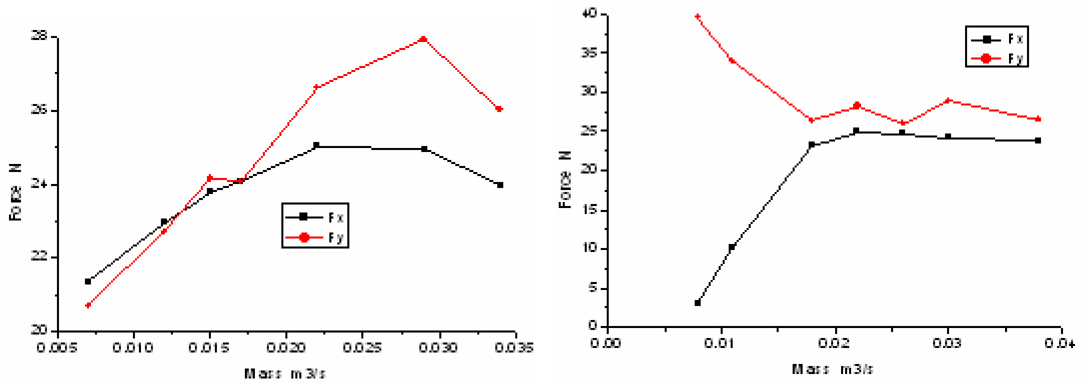
$$P = P(l)$$

并沿防波堤表面对这些压强积分即可得到作用于半圆型防波堤上的作用力：

$$F_x = \int P \cdot n_x ds = \int P(l) \cdot \cos(l / R) dl$$

$$F_y = \int P \cdot n_y ds = \int P(l) \cdot \sin(l / R) dl$$

上式中 F_x 是总压力的水平分量； F_y 是总压力的垂直分量。 n_x 和 n_y 分别表示半圆型防波堤表面法线方向在 x 和 y 方向的分量。（如图 4-3-1-4 所示）



A 浅水位流动　　　　**B** 深水位流动

图 4-3-1-4 F_x 、 F_y 与流量的关系图

半圆形防波堤分离涡的流动显示

在实验装置中，将测压导管从多管微压计上拔下，连接到染色液贮液罐的出口，适当提升染色液贮液罐的高度，在压力的作用下，染色液分别从不同测压孔流出，通过流动显示可以在半圆型防波堤表面明显观察到由于逆压梯度产生的分离和回流现象以及强烈的分离涡脱落(如图所示)。

根据流动显示照片并对比表面压力分布测量结果，分析半圆型防波堤表面流动分离和回流现象产生的原因，研究半圆型防波堤表面流动分离点的受力状况，研究半圆型防波堤表面流动分离的危害和控制方法，研究如何避免半圆型防波堤表面流动分离。

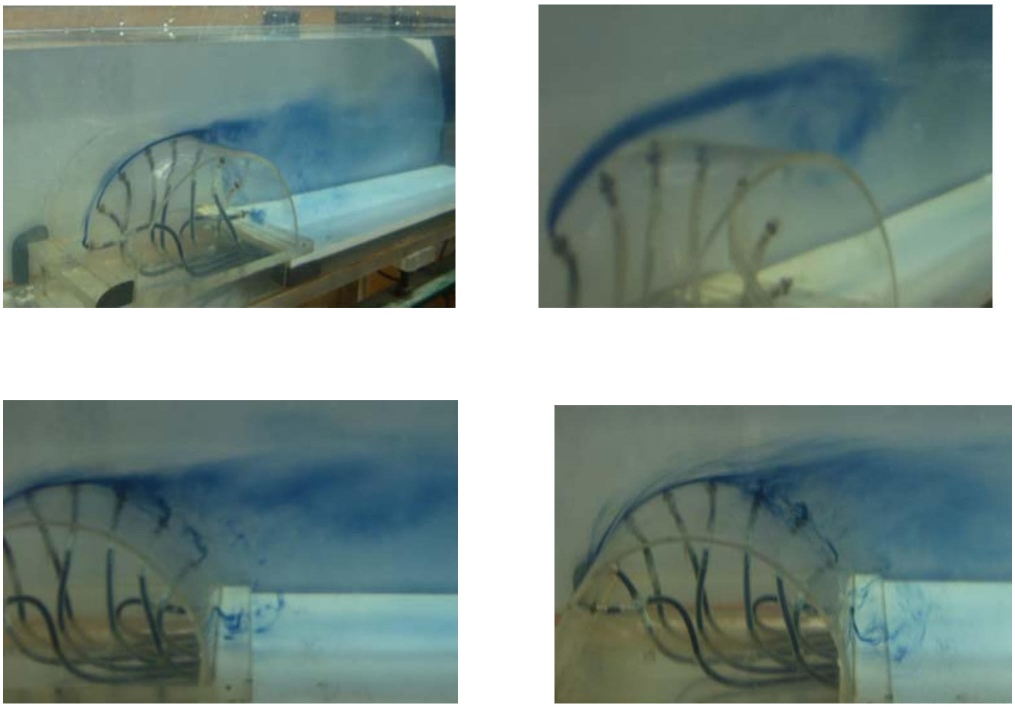


图 4-3-2-1 半圆型防波堤流动显示照片

实验 20　　各种管道的流动显示

一、实验原理

KL 型流动显示仪组成如图一所示。该仪器以气泡为示踪介质。狭缝流道中设有特定边界，用以显示内流、外流、射流元件等多种流动图谱。半封闭状态下的工作流体（水）由水泵驱动蓄水箱 5（图 1-1）内的水经掺气后流经显示板，形成无数小气泡随水流流动，在仪器内的日光灯照射和显示板的衬托下，小气泡发出明亮的折射光，清楚地显示出小气泡随水流动的图象。由于气泡的粒径大小、掺气量的多少可由阀 4 调节，故能使小气泡相对水流动具有足够的跟随性。显示板设计成多种不同形状边界的流道，因而，能十分形象、鲜明地显示不同边界流场的迹线、边界层分离、尾流、旋涡等多种流动图谱。

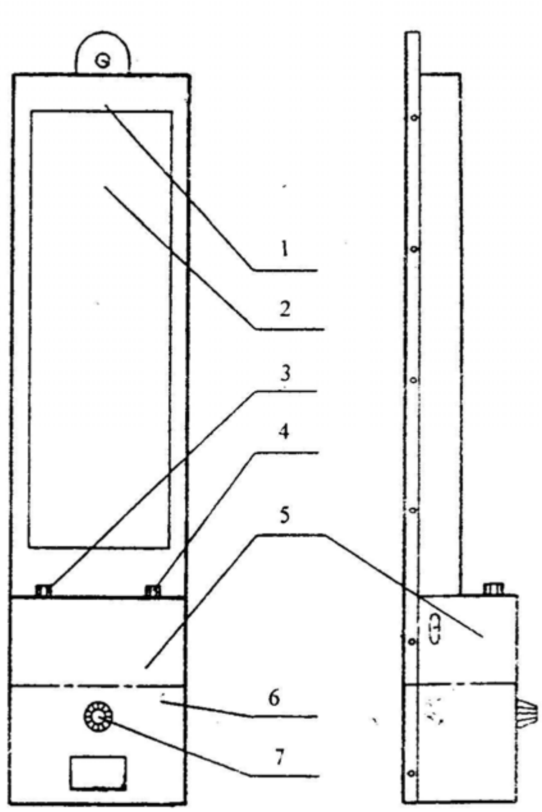


图 1-16-1　　结构示意图

1 彩色有机玻璃面罩　2 不同边界的流动显示面
3 加水孔　4 掺气量调节阀　5 蓄水箱
6 电器、水泵室　7 可控硅无级调速旋钮

本仪器流程如图 1-2 所示。

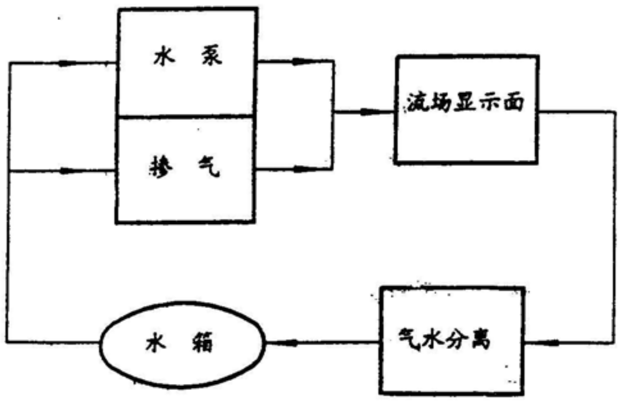


图 1－16－2　　仪器工作流程图

二、实验演示内容介绍

1）ZL—1 型（图 1-16-1）用以显示逐渐扩散、逐渐收缩、突然扩大、突然收缩、壁面冲击、直角弯道等平面上的流动图象，模拟串联管道纵剖面流谱。

在逐渐扩散可看到由边界层分离而形成的旋涡，且靠近上游喉颈处，调节流速时可以看到流速越大，涡旋尺度越小，湍流强度越高；而在逐渐收缩段，无分离，流线均匀收缩，亦无旋涡，由此可知，逐渐扩散段局部水头损失大于逐渐收缩段。

在突然扩大段出现较大的旋涡区，而突然收缩只在死角处和收缩断面的进口附近出现较小的旋涡区。表明突扩段比突缩段有较大的局部水头损失（缩扩的直径比大于 0.7 时例外），而且突缩段的水头损失主要发生在突缩断面后部。

由于本仪器突缩段较短，故其流谱亦可视为直角进口管咀的流动图象。在管咀进口附近，流线明显收缩，并有旋涡产生，致使有效过流断面减小，流速增大。从而在收缩断面出现真空。

在直角弯道和壁面冲击段，也有多处旋涡区出现。尤其在弯道流中，流线弯曲更剧，越靠近弯道内侧，流速越小。且近内壁处，出现明显的回流，所形成的回流范围较大，将此与 ZL—2（1-16-2）型中园角转弯流动对比，直角弯道旋涡大，回流更加明显。

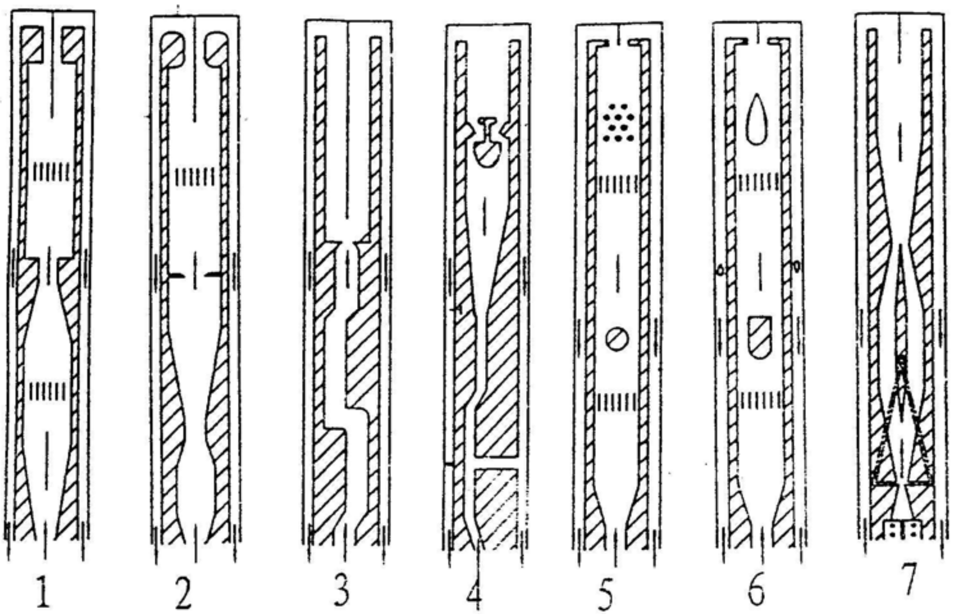


图 1－16－3　　显示面过流道示意图

旋涡的大小和脉动强度与流速有关。可通过流量调节观察对比，例如流量减小，渐扩段流速较小，其强度也较小，这时可看到在整个扩散段有明显的单个大尺度涡旋。反之，当流量增大时，这种单个尺度涡旋随之破碎，并形成无数个小尺度的涡旋，且流速越高，强度越大，旋涡越小，可以看到，几乎每一个质点都在其附近激烈地旋转着。在突扩段，也可看到旋涡尺度的变化。据此清楚表明：脉动强度越大，涡旋尺度越小，几乎每一个质点都在其附近激烈地旋转着。由于水质点间的内磨擦越厉害，水头损失就越大。

2）ZL—2 型（图 1－16－3、2）显示文丘里流量计、孔板流量计、园弧进口管咀流量计以及壁面冲击、园弧形弯道等串联流道纵剖面上的流动图象。

由显示可见，文丘里流量计的过流顺畅，流线顺直，无边界层分离和旋涡产生。在孔板前，流线逐渐收缩，汇集于孔板的孔口处，只在拐角处有小旋涡出现，孔板后的水流逐渐扩散，并在主流区的周围形成较大的旋涡区。由此可知，孔板流量计的过流阻力较大；园弧进口管咀流量计入流顺畅，管咀过流段上无边界层分离和旋涡产生；在园形弯道段，边界层分离的现象及分离点明显可见，与直角弯道比较，流线较顺畅，旋涡发生区域较小。

由上可了解三种流量计结构、优缺点及其用途。孔板流量计结构简单，测量精度高，但水头损失很大。作为流量计损失大是缺点，但有时将其移作它用，例如工程上的孔板消能又是优点。另外从型 1 或 2 的弯道水流观察分析可知，在弯头段测压管水头不按静水压强的规律分布，其原因：①离心惯性力的作用，②流速分布不均匀（外侧大、内侧小并产生回流）等所致。

3）ZL—3 型（图 1-16-3）显示 30^0 弯头、直角园弧弯头、直角弯头、45^0 弯头以及非自由射流等流段纵剖面上的流动图象。

由显示可见，在每一转弯的后面，都因边界层分离而产生旋涡。转弯角度不同，旋涡大小、形状各异。在园弧转弯段，流线较顺畅。在非自由射流段，射流离开喷口后，不断卷吸周围的流体，形成射流的湍流扩散。在此流段上还可看到射流的“附壁效应”现象。（详细介绍见 ZL—7 型）。

4）ZL—4 型（图 1-16-4）显示 30^0 弯头、分流、合流、45^0 弯头，YF—溢流阀、闸阀及蝶阀等流段纵剖面上的流动图谱。其中 YF—溢流阀固定，为全开状态，蝶阀活动可调。

由显示可见，在转弯、分流、合流等过流段上，有不同形态的旋涡出现。合流涡旋较为典型，明显干扰流，使主流受阻，这在工程上称之为“水塞”现象。为避免“水塞”，给排水技术要求合流时用 45^0 三通连接。闸阀半开，尾部旋涡区较大，水头损失也大。蝶阀全开时，过流顺畅，阻力小，半开时，尾涡脉动激烈，表明阻力大且易引起振动。蝶阀通常作检修用，故只允许全开或全关。

YF—溢流阀广泛用于液压传动系统。其流动介质通常是油，阀门前后压差可高达 315bar，阀道处的流速可高达每秒二百多米。本装置流动介质是水，为了与实际阀门的流动相似（雷诺数相同），在阀门前加一减压分流，该装置能十分清晰地显示阀门前后的流动形态：高速流体经阀口喷出后，在阀芯的大反弧段发生边界层分离，出现一圈旋涡带；在射流和阀座的出口处，也产生一较大的旋涡环带。在阀后，尾迹区大而复杂，并有随机的卡门涡街产生。经阀芯芯部流过的小股流体也在尾迹区产生不规则的左右扰动。调节过流量，旋涡的形态基本不变，表明在相当大的雷诺数范围内，旋涡基本稳定。

该阀门在工作中，由于旋涡带的存在，必然会产生较激烈的振动，尤其是阀芯反弧段上的旋涡带，影响更大，由于高速流体的湍流脉动，引起旋涡区真空度的脉动，这一脉动压力直接作用在阀芯上，引起阀芯的振动，而阀芯的振动又作用于流体的脉动和旋涡区的压力脉动，因而引起阀芯的更激烈振动。显然这是一个很重要的振源，而且这一旋涡环带还可能引起阀芯的空蚀破坏。另外，显示还表明，阀芯的受力情况也不太好。为改进阀门的性能提供了根据。

5）ZL—5 型（图 1-16-5）显示明渠逐渐扩散，单园柱绕流、多园柱绕流及直角弯道等流段的流动图象。

由显示可见，单园柱绕流时的边界层分离状况，分离点位置、卡门涡街的产生与发展过程以及多园柱绕流时的流体混合、扩散、组合旋涡等流谱，现分述如下：

（1）驻点　观察流经前驻点的小气泡，可见流速的变化由$v_0 \to 0 \to v_{max}$流动在驻点上明显停滞（可说明能量的转化及毕托管测速原理）。

（2）边界层分离　可观察边界层转捩点及边界层分离现象。仔细观察可以看到边界层分离后的回流以及园柱绕流转捩点的位置。

（3）卡门涡街　圆柱的轴与来流方向垂直。在圆柱的两个对称点上产生边界层分离后，不断交替地在两侧向下游发射出旋转方向相反的旋涡，这些旋涡在圆柱后反对称排列两行形成卡门（Karman）“涡街”。

对卡门涡街的研究，在工程实际中有很重要的意义。每当一个旋涡脱离开柱体时，根据汤姆逊（Thomson）环量不变定理，必须在柱体上产生一个与旋涡具有的环量大小相等方向相反的环量，由于这个环量使绕流体产生横向力，即升力。注意到在柱体的两侧交替地产生着旋转方向相反的旋涡，因此柱体上环量的符号交替变化，横向力的方向也交替地变化。这样就使柱体产生了一定频率的横向振动。若该频率接近柱体的自振频率，就可能产生共振，为此常采用一些工程措施加以解决。

（4）多园柱绕流，被广泛用于热工中的传热系统的“冷凝器”及其他工业管道的热交换器等，流体流经园柱时，边界层内的流体和柱体发生热交换，柱体后的旋涡则起混掺作用，然后流经下一柱体，再交换再混掺。换热效果较佳。另外，对于高层建筑群，也有类似的流动图象，即当高层建筑群承受大风袭击时，建筑物周围也会出现复杂的风向和组合气旋，即使在独立的高建筑物下游附近，也会出现分离和尾流。这应引起建筑师的重视。

6）ZL—6 型（图 1-16-6）显示明渠渐扩、桥墩形钝体绕流、流线体绕流、直角弯道和正、反流线体绕流等流段上的流动图谱。

桥墩形柱体绕流　该绕流体为圆头方尾的钝形体，水流脱离桥墩后，形成一个旋涡区——尾流，在尾流区两侧产生旋向相反且不断交替的旋涡，即卡门涡街。与圆柱绕流不同的是，该涡街的频率具有较明显的不规则性。

由此说明：

（1）非圆柱体绕流也会产生卡门涡街；

（2）对比观察园柱绕流和该钝体绕流可见：前者涡街频率 f 在 Re 不变时它也不变；而后者，即使 Re 不变 f 的变化也不规则。由此说明了为什么圆柱绕流频率有确定的经验公式，而非园柱绕流频率一般没有这样的公式。

流线形柱体绕流，这是绕流的最好形式，流动顺畅，形体阻力最小。又从正、反流线体

的对比流动可见，当流线体倒置时，也会出现卡门涡街。因此，为使过流平稳，应采用顺流而放的园头尖尾形柱体。

7）ZL—7 型（图 1-16-7）为“双稳放大射流阀”流动原理显示仪。经喷嘴喷出的射流（大信号）可附于任一侧面，若先附于左壁，射流经左通道后，向右出口输出；当旋转仪器表面控制圆盘，使左气道与圆盘气孔相通时（通大气），因射流获得左侧的控制流（小信号），射流便切换至右壁，流体从左出口输出。这时若再转动控制圆盘，切断气流，射流稳定于原通道不变。如果使射流再切换回来，只要再转动控制圆盘，使右气道与圆盘气孔相通即可。因此，该装置既是一个射流阀，又是一个双稳射流控制元件。只要给一个小信号（气流），便能输出一个大信号（射流），并能把脉冲小信号保持记忆下来。

由演示所见的射流附壁现象，又被称作“附壁效应”。利用附壁效应可制成“或门”、“非门”、“或非门”等各种射流元件，并可把它们组成自动控制系统或自动检测系统。由于射流元件不受外界电磁干扰，较之电子自控元件有其独特的优点。故在军工等方面也有应用。

作为射流元件在自动控制中的应用示例，ZL—7 型还配置了液位自动控制装置。图四为 a 通道自动向左水箱加水状态。左右水箱的是高水位由溢流板（中板）控制，最低水位由 a_1、b_1 的位置自动控制。其原理是：

水泵启动，本仪器流道喉管 a_2、b_2 处由于过流断面较小，流速过大，形成真空。在水箱水位升高产生溢流，喉管 a_2、b_2 处所承受的外压保持恒定。当仪器运行到如图四状态时，右水箱水位因 b_2 处真空作用下抽吸而下降，当液位降到 b_1 小孔高程时，气流则经 b_1 进入 b_2，b_2 处升压（a_2 处压力不变），使射流切换到另一流道即 a_2 一侧，b_2 处进气造成 a_2、a_3 间断流，a_3 出口处的薄膜逆止阀关闭，而 $b_4 \to b_3$ 过流，b_3 出口处的薄膜逆止阀打开，右水箱加水。其过程与左水箱加水相同，如此往复循环，十分形象地展示了射流元件自动控制液位的过程。

射流元件在其它工控中亦有广泛应用。从中进一步了解流体力学应用领域之广泛性。这种装置在连续流中可利用工作介质直接控制液位。操作中还须注意，开机后需等 1~2 分钟，待流道气体排净后再实验。否则仪器将不能正常工作。

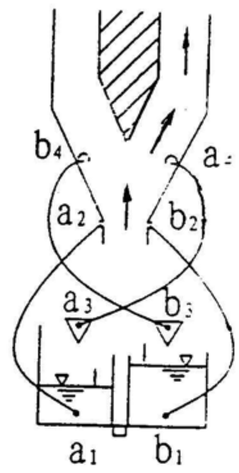


图 1－16－4　射流元件示意图

上半图为双稳放大射流阀;下半图为双水箱容器 a_1、b_1、a_3、b_3 容器后壁小孔分别是与孔 a_2、b_2 及毕托管取水咀 a_4、b_4 联通。

三、实验仪器和设备

流动显示挂图

四、实验目的和要求

通过观察流动显示挂图，结合课堂理论学习，掌握逐渐扩散、逐渐收缩、突然扩大、突然收缩、壁面冲击、直角弯道、文丘里流量计、孔板流量计、园弧进口管咀流量计以及壁面冲击、园弧形弯道、300 弯头、直角园弧弯头、直角弯头、450 弯头以及非自由射流、300 弯头、分流、合流、450 弯头，YF—溢流阀、闸阀及蝶阀、明渠逐渐扩散，单园柱绕流、多园柱绕流及直角弯道、明渠渐扩、桥墩形钝体绕流、流线体绕流、直角弯道和正、反流线体绕流、双稳放大射流阀等流动图谱的基本原理和工程应用。能够结合流动图谱的基本原理对流动现象进行讲解和说明。

五、问题讨论与思考

1．简述实验中所用的流动显示仪的工作原理。所显示的各种流道的流动情况是否能反映出各种管道的真实流动，为什么？

2．结合本实验的内容试说明一、二种实际应用的例子。（如圆柱绕流、孔板等）

笔 记

天津大学

流体力学实验室

天津大学流体力学实验室是 1959 年由原天津大学校长，著名教育家、流体力学家张国藩教授创立的。经过 50 多年的建设和发展，现在是天津大学国家工科力学基础课教学基地、天津大学力学工程国家级实验教学示范中心、天津大学国家级力学教学团队、天津市现代工程力学重点实验室的重要组成部分，是天津市技术监督局气体流量仪表检测站。实验室的特色是：以学科建设为依托，教学与科学研究紧密结合，及时把科研成果转化为实验教学内容，不断提高教学水平和教学质量。“流体力学提高教学质量的改革”分别获得 1996 年天津市优秀教学成果一等奖和 1997 年国家级优秀教学成果一等奖，《湍流及其控制》获得 2004 年天津市自然科学一等奖。

实验室目前开设的流体力学实验教学课程有：本科生工程力学专业《流体力学》、《流体力学实验技术》、《湍流概论》，本科生内燃机与工程热物理专业《工程流体力学》；硕士生流体力学专业、动力机械专业、工程热物理专业、低温与制冷专业、热能工程专业《工程流动测试理论与方法》、《流体力学实验技能》、《实验流体力学》、《湍流理论》；博士生流体力学专业、流量仪表与检测专业、水利工程专业、化工过程与装备专业《实验流体力学》、《湍流实验与测量技术》等。

实验室技术力量雄厚，测试仪器先进，拥有目前国际最先进的 Dantec-层析 TRPIV、2D-TRPIV 各一台，三分量激光多普勒测速系统（3D-LDV)一台、六通道热线热膜测速系统(HWA)一套，IFA300 四通道智能化热线热膜测速测温系统两台、1193E 型计算机自动控制步进电机精密坐标架两套、低速回流式风洞一座，直流式低湍流度风洞一座、中型水槽一座、小型水槽和风洞多座，自行开发研制了多种数据采集、数据分析、流动图像采集、流动图像处理软件，能够满足开展湍流教学实验和科研实验的需要，湍流测试技术居国际先进水平。